



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Escuela de  
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

**Máster en Ingeniería de Minas**



**Trabajo Fin de Máster**

**Estaciones de carga de vehículos eléctricos y su  
influencia en el funcionamiento de la red de distribución**

**Autor: Juan Antonio González Díaz**

**Tutor: Carlos Hiram Rojas García**

**Oviedo, Junio de 2016**

# Índice

1	INTRODUCCIÓN .....	7
1.1	Necesidad ambiental y energética de cambio del modelo de transporte, reducción del uso de combustibles fósiles.....	7
1.2	Objetivos del proyecto .....	10
2	EL COCHE ELÉCTRICO.....	13
2.1	Vehículos eléctricos con batería convencional .....	13
2.2	Consumo y eficiencia energética del vehículo eléctrico .....	16
3	BATERÍAS Y ESTACIONES DE CARGA.....	22
3.1	Tecnologías de baterías.....	22
3.2	Modelo de carga-descarga de la batería tipo Ion-Litio .....	24
3.3	Modelo de estación de carga del vehículo eléctrico.....	27
3.4	Modelo de convertidor (rectificador) .....	27
3.5	La estación de carga .....	30
3.6	Comunicación, vehículo-estación de carga.....	33
3.7	Conexión vehículo - estación de carga: equipamiento .....	37
3.8	Sistema de carga rápida .....	42
3.9	Carga inductiva.....	44
3.10	Resumen .....	46
4	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN CON CARGAS TIPO CARGADORES EV .....	49
4.1	La red de distribución IEEE 15 bus test feeder.....	49
4.2	Planteamiento y solución del problema de flujos de cargas .....	51
4.3	Datos de consumo de las estaciones de carga.....	61
4.4	Casos de estudio.....	62
4.5	Comparación de los estudios de flujos de carga en los diferentes escenarios ..	68
4.6	Estudio de tensiones .....	68
	Conclusiones del análisis de tensiones .....	74
4.7	Corrientes.....	74
	Conclusiones del análisis de corrientes .....	78

4.8 Pérdidas.....	78
5 CONCLUSIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	82

# Listado de figuras

FIG. 1. EFECTO DE INDUCCIÓN RADIATIVA DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO DE FUENTES HUMANAS Y NATURALES [3] .....	8
FIG. 2. CONCENTRACIÓN ATMOSFÉRICA DE LOS CUATROS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO, ACTUALMENTE Y EN LA ETAPA PREINDUSTRIAL. [4] .....	9
FIG. 3. MODELO CONCEPTUAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO CON BATERÍA CONVENCIONAL. [6].....	14
FIG. 4. COCHE FORD FOCUS ELECTRIC .....	16
FIG. 5. MODELO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA ION-LITIO (INTERCALACIÓN, DESINTERCALACIÓN). [9] .....	23
FIG. 6. CURVA TÍPICA DE DESCARGA. [10] .....	24
FIG. 7. MODELO DE CARGA-DESCARGA DE LA BATERÍA. [10] .....	27
FIG. 8. MODELO EN SIMULINK DE CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA. ....	27
FIG. 9. ESQUEMA DE UN SCR. ....	28
FIG. 10 . CIRCUITO RECTIFICADOR TRIFÁSICO (AC-DC) [12] .....	29
FIG. 11. CORRIENTE TRIFÁSICA RECTIFICADA. ....	29
FIG. 12. RIESGO DE CONTACTO INDIRECTO, AL NO DISPONER DE TOMAR TIERRA.....	31
FIG. 13. ELEMENTO DE CONTROL PARA ESTACIONES DE CARGA MODO 2 Y 3.....	31
FIG. 14. DISPOSITIVO DE CONTROL CON COMUNICACIÓN CON LA RED ELÉCTRICA.....	33
FIG. 15. SISTEMA DE COMUNICACIÓN Y LOS ELEMENTOS QUE LO COMPONEN.....	36
FIG. 16. CONEXIÓN TIPO CASO "A" .....	38
FIG. 17. CONEXIÓN TIPO CASO "B" .....	38
FIG. 18. CONEXIÓN TIPO CASO "C" .....	39
FIG. 19. CONECTOR TRIFÁSICO PROPUESTO ("VEHICLE TO GRID").....	41
FIG. 20. CARGA RÁPIDA CON EQUIPO INVERSOR .....	43
FIG. 21. PALETA DE CARGADOR INDUCTIVO .....	45
FIG. 22. CARGA DE VEHÍCULO CON CARGADOR INDUCTIVO DE PALETAS .....	45
FIG. 23. DISEÑOS DE CONEXIONES AUTOMÁTICAS DE CARGA INDUCTIVA .....	46
FIG. 24. RED IEE 15 BARRAS.....	50
FIG. 25. GRÁFICA DE LA FUNCIÓN Y DE LAS RECTAS CORRESPONDIENTES A LAS DOS ITERACIONES.....	59
FIG. 26. RED IMPLEMENTADA EN SIMULINK, SIN PUNTOS DE CARGA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO. ....	64
FIG. 27. CURVA DE DEMANDA DIARIA (FUENTE: REE [14]).....	65
FIG. 28. RED IMPLEMENTADA EN SIMULINK, CON PUNTOS DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. LAS ESTACIONES DE CARGA ESTÁN REMARCADAS CON RECUADROS ROJOS. ....	66
FIG. 29. HIPÓTESIS CONSUMO DE LAS ESTACIONES DE CARGA.....	67
FIG. 30. TENSIONES EN PU EN BARRAS EN HORAS VALLE .....	69
FIG. 31. LOCALIZACIÓN DE LAS BARRAS 5, 12 Y 13 EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN .....	69

FIG. 32. TENSIONES EN PU EN BARRAS SENSIBLES, HORAS VALLE .....	70
FIG. 33. TENSIONES EN PU EN BARRAS EN HORAS DE DEMANDA INTERMEDIA.....	71
FIG. 34. TENSIONES EN PU EN BARRAS SENSIBLES, HORAS DE DEMANDA INTERMEDIA .....	72
FIG. 35. TENSIONES EN PU EN BARRAS EN HORAS PICO .....	73
FIG. 36. TENSIONES EN PU EN BARRAS SENSIBLES, HORAS PICO .....	73
FIG. 37. ANÁLISIS DE CORRIENTES DE LÍNEA EN HORAS VALLE.....	76
FIG. 38. ANÁLISIS DE CORRIENTES DE LÍNEA EN HORAS DE DEMANDA INTERMEDIA .....	76
FIG. 39. ANÁLISIS DE CORRIENTES DE LÍNEA EN HORAS PICO .....	77
FIG. 40. PÉRDIDAS ELÉCTRICAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN. ....	78

# **CAPÍTULO 1**

INTRODUCCIÓN

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Necesidad ambiental y energética de cambio del modelo de transporte, reducción del uso de combustibles fósiles

El índice actual de crecimiento de la población mundial junto con el crecimiento económico generará un crecimiento de la demanda de energía primaria. Según la asociación internacional de la energía (AIE) el consumo mundial de energía aumentará para el año 2025 un 50% en comparación con el nivel del año 2005, el equivalente a 15 millones de *toneladas equivalentes de petróleo* (tep) [1]. El crecimiento de la demanda energética será más acentuado en los países en vías de desarrollo y no pertenecientes a la OCDE. Debido al aumento de la demanda energética, los combustibles fósiles seguirán siendo la base de la demanda de energía primaria, se prevé que el consumo de petróleo comience a decaer levemente en favor del gas natural y las energías renovables.

La UE tiene una gran dependencia energética, el 73% de la demanda energética es suplida por el petróleo del cual el 30% es consumido por el sector del transporte [2].

Hoy en día, los motores de combustión interna dependen en gran medida de los combustibles fósiles, el agotamiento de las reservas de hidrocarburos y las crecientes y continuas crisis económicas y geopolíticas generan un estado actual inestable.

Además el transporte es responsable del 26% de emisiones de gases de efecto invernadero totales de la Unión Europea. Actualmente con las nuevas medidas medioambientales adoptadas para los coches de nueva fabricación se redujeron las emisiones de CO<sub>2</sub> a 120 g CO<sub>2</sub>/ km, lo que supuso una reducción del 25% de emisiones [2]. Aun así esta reducción es insuficiente ya que el sector transporte crece anualmente en torno al 30% [2], por lo que es necesario adoptar un nuevo sistema de transporte sostenible y más respetuoso con el medio ambiente.

Hay varios gases que provocan el efecto invernadero los cuales tienen un grado de impacto variable climáticamente hablando, los generados a raíz de procesos de combustión

son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ) y el  $N_2O$ , otros gases como los refrigerantes y algunas partículas también contribuyen al efecto invernadero como por ejemplo el ozono, el monóxido de carbono ( $CO$ ), el hollín, compuestos orgánicos volátiles, etc.

En la siguiente figura se presenta la contribución de los diferentes gases en el efecto invernadero, se muestra en términos de  $w/m^2$ .

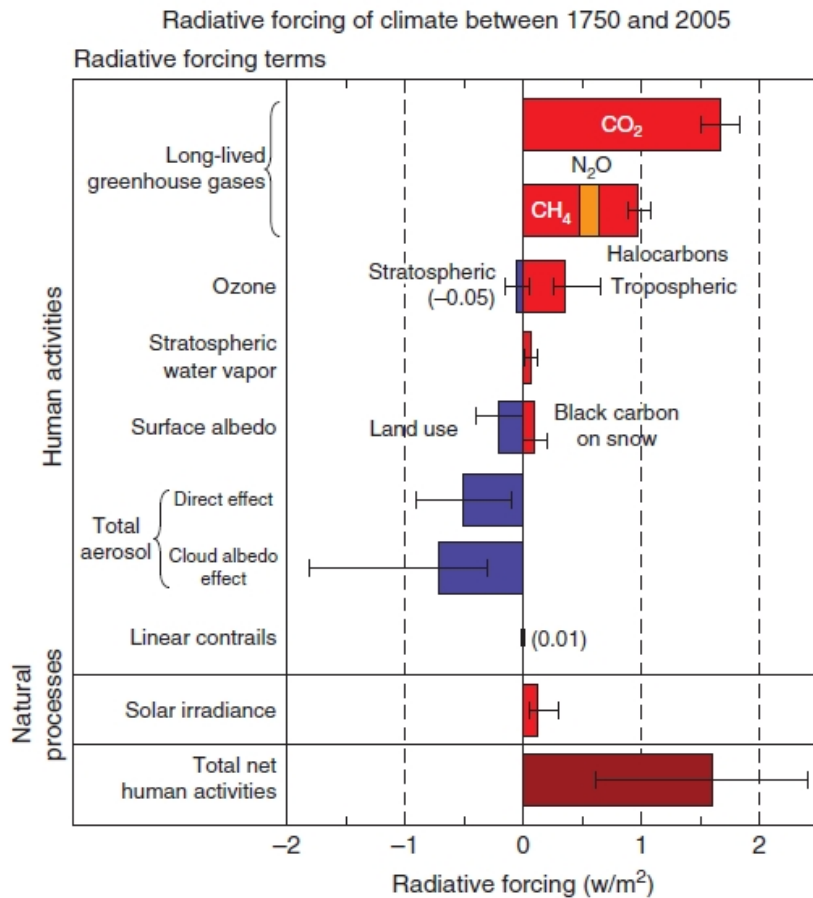


Fig. 1. Efecto de inducción radiativa de los gases de efecto invernadero de fuentes humanas y naturales [3]

Se puede observar como el  $CO_2$  tiene el mayor efecto, pero también hay otros gases que tienen un efecto notable. Por ejemplo, el ozono y los aerosoles que se omiten en la mayoría de los análisis de las emisiones de los vehículos eléctricos, han tenido un mayor efecto de inducción radiativa absoluta que tiene  $N_2O$ .



La siguiente tabla resume los niveles pre-industriales y actuales de la concentración atmosférica de los cuatro principales gases de efecto invernadero, así como su aumento total y el correspondiente nivel de aumento de la fuerza radiactiva en  $W/m^2$ . El aumento de las concentraciones de  $CO_2$  ha sido el principal causante del aumento de la inducción radiativa de estos gases, aunque los otros en una menor medida también contribuyen de manera significativa.

Gas	Preindustrial level	Current level	Increase since 1750	Radiative forcing ( $W/m^2$ )
Carbon dioxide	280 ppm	385 ppm	105 ppm	1.66
Methane	700 ppb	1,741 ppb	1,045 ppb	0.48
Nitrous oxide	270 ppb	321 ppb	51 ppb	0.16
Ozone	25	34 ppb	9 ppb	0.35
CFC-12	0	533 ppt	533 ppt	0.17

*Fig. 2. Concentración atmosférica de los cuatro principales gases de efecto invernadero, actualmente y en la etapa preindustrial. [4]*

La Unión Europea se ha dado cuenta sobre la necesidad de reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de limitar el cambio climático a menos de  $2^\circ C$ . Para poder alcanzar este objetivo, la UE necesita reducir un 80-95 % de sus emisiones por debajo de los niveles de 1990, y hacerlo antes de 2050.

El sistema de transporte actual no es sostenible. En años venideros la dependencia del crudo del transporte podría seguir siendo algo inferior al 90 %, con fuentes de energía renovables que superasen solo de forma marginal el objetivo del 10 % establecido para 2020. Para el año 2050, las emisiones de dióxido de carbono  $CO_2$  procedentes del transporte seguirían estando una tercera parte por encima de su nivel de 1990. Los costes de la congestión aumentarán en cerca del 50 % para 2050. [5]

Los vehículos eléctricos pueden ofrecer importantes reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los vehículos convencionales en un ciclo de combustible completo. Bajo ciertas condiciones, los vehículos eléctricos tienen emisiones de gases de efecto invernadero casi nulas, cuando la generación de energía está basada en fuentes renovables.

Varios estudios demuestran que los vehículos eléctricos pueden reducir la emisión de gases de efecto invernadero en cantidades que oscilan mucho debido al tipo de mix energético de la región particular implicada, entre otros factores. Estados Unidos por ejemplo tendría unas reducciones del orden del 20-50%, dependiendo del nivel relativo de carbón frente a gas natural y las energías renovables. En países con un mix energético casi copado totalmente por la energía nuclear se puede llegar a reducciones del 90%. En el caso de España las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero pueden llegar a ser del 70%, debido a que tenemos una alta producción de energía nuclear, eólica e hidráulica. [4].

Es por lo tanto muy importante tener en cuenta, que las emisiones que producirán los diferentes tipos de vehículos eléctricos son muy variables y dependientes de los “mix energéticos” de cada país.

Los vehículos eléctricos ofrecen por lo tanto un gran potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Es por lo tanto evidente que en visión de una mayor protección del medioambiente se necesita perseguir un mayor desarrollo de este tipo de transporte más eficiente, ya que en los próximos años se prevé un mayor crecimiento de número de vehículos sumado a la disminución de recursos naturales (fósiles) que lo “alimentan”.

## 1.2 Objetivos del proyecto

Como objetivo general se plantea efectuar un estudio introductorio sobre el posible impacto de las estaciones de carga de baterías de coches eléctricos sobre la red de distribución de energía eléctrica. Como objetivos específicos se proponen los siguientes:

1. Efectuar un estudio bibliográfico relacionado con el estado actual de la técnica del vehículo eléctrico y la pertinencia de estas tecnologías en la reducción del impacto ambiental del sector transporte actual y del ahorro energético.
2. Revisar las técnicas de modelado y simulación de los sistemas eléctricos de potencia utilizando programas informáticos de amplio uso en la industria.
3. Modelar una red de distribución eléctrica incluyendo estaciones de carga de baterías para vehículos eléctricos.

4. Estudiar las variables eléctricas principales de la red con cargas tipo *estaciones de carga de baterías para coches eléctricos*. En la consecución de este objetivo, se plantea simular diferentes escenarios en los que la red funcione con y sin estaciones de baterías y con unos índices de carga global que reflejen la *curva de carga diaria* típica de un día laboral.

# **CAPÍTULO 2**

EL COCHE ELÉCTRICO

## 2 EL COCHE ELÉCTRICO

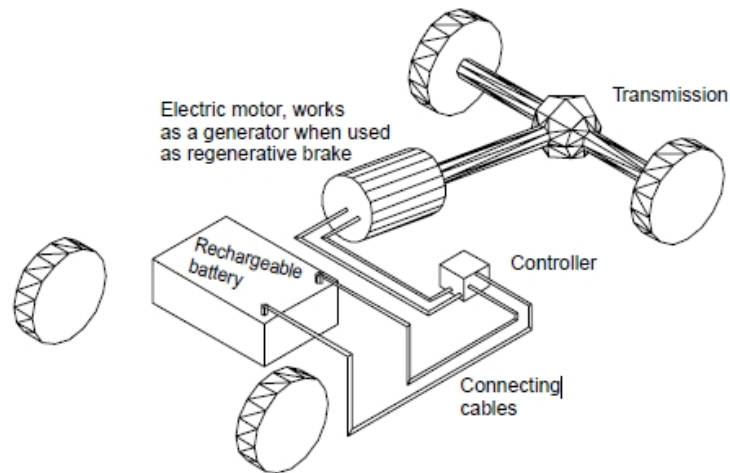
Existen actualmente seis tipos básicos de vehículos eléctricos, los cuales pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Vehículos eléctricos de batería “tradicional”.
- Vehículos eléctricos híbridos, que combinan una batería y un motor de combustión interna.
- Vehículos que utilizan combustible reemplazable como fuente de energía células de combustible o baterías de aire-metal.
- Vehículos conectados a líneas eléctricas.
- Vehículos que emplean la energía solar de forma directa.
- Vehículos que acumulan la energía por medios alternativos tales como supercondensadores, suelen ser híbridos ya que utilizan alguna otra fuente de energía alternativa.

En el caso del presente proyecto se analizará el estudio sobre un vehículo eléctrico con batería (EV), a continuación se explica en líneas un poco generales el modelo del vehículo eléctrico con batería convencional.

### 2.1 Vehículos eléctricos con batería convencional

El concepto de vehículo eléctrico con batería no es demasiado complejo y es el que se muestra en la siguiente figura:



*Fig. 3. Modelo conceptual del vehículo eléctrico con batería convencional. [6]*

El vehículo consta de una batería eléctrica para el almacenamiento de energía, un motor eléctrico, y un controlador.

La batería se recarga normalmente a partir de la red eléctrica a través de un enchufe y una unidad de carga de la batería que en ocasiones es “on board” u “off board” es decir implementado en el vehículo o en el punto de carga.

El controlador controla la potencia suministrada al motor, y por tanto la velocidad del vehículo. Es lo que se conoce como un controlador de dos cuadrantes. Por lo general en este tipo de vehículos eléctricos se usan sistemas regenerativos de frenado con el fin de recuperar energía y como una forma conveniente de frenado sin fricción.

A continuación vamos a ver algunos modelos de coches eléctricos de batería convencional que se están comercializando actualmente. Cabe destacar que muchos de los grandes fabricantes de automóviles tienen su propio modelo de coche eléctrico, algunos tan solo disponen de modelos híbridos pero cada vez más marcas están diseñando su propio modelo de vehículo eléctrico con batería. Marcas como, BMW, Chevrolet, Citroën, Mercedes-Benz, Ford, Nissan, Renault o Porsche tienen modelos de coches eléctricos a la venta. Cabe destacar Tesla como una empresa pionera en el desarrollo de coches eléctricos la cual actualmente está estudiando la posibilidad de abrir una factoría de ensamblado de vehículos eléctricos en Europa.

El precio de los vehículos eléctricos aún está bastante por encima que el de vehículos con un motor convencional, sin embargo su tendencia a la baja hará que la competitividad de los mismos sea cada vez mayor, esto unido a las expectativas de menores emisiones prevé a corto medio plazo que el vehículo eléctrico sea una realidad en nuestras carreteras y no una anomalía.

Por ejemplo si quisiéramos comprar un vehículo de tamaño mediano con una potencia del rango de los 100 CV, su precio ronda entre los 35.000 y los 60.000 € dependiendo de la marca, lo cual es un precio muy elevado comparado con su homólogo de gasolina o diésel. En la siguiente tabla se recogen casi todos los modelos de coches eléctricos (de batería) que hay en la actualidad.

Audi A3 e-Tron	Nissan LEAF
Audi R8 e-Tron	Peugeot iOn
Audi Urban Concept	Renault DeZir
BMW ActiveE	Renault Fluence Z.E.
BMW i3 Concept	Renault Frenzy
BMW i8	Renault Kangoo Z.E.
BYD e6 75kw	Renault Twizy (ZE)
Chanaa Benni	Renault ZOE (ZE)
Chevrolet Volt	Seat IBE Concept
Citröen Berlingo First Eléctrico	Smart Insect
Citröen C-Zero	Smart fortwo electric drive
Ford Focus Electric	Tesla Model S
Honda EV Concept	Tesla Roadster
Mercedes Benz AMG SLS E-Cell	Think City
Mercedes Benz Clase A E-Cell	Toyota iQ-EV
Mercedes Benz Vito E-Cell	Volswagen E-Bugster
Mini E	Volswagen Golf Blue-e-Motion
Mitsubishi i MiEV	Volswagen NIL S
Nissan e-NV200	Volvo C30 Electric

*Tabla 1. Recopilación de varios modelos de coches eléctricos*

Varios de los mencionados anteriormente en la tabla se encuentran en pruebas o tan solo son comercializados en ciertos países, como por ejemplo el Ford Focus Electric, actualmente en pruebas en California y se espera que en 2017 de el salto al mercado europeo.



*Fig. 4. Coche Ford Focus Electric*

## 2.2 Consumo y eficiencia energética del vehículo eléctrico

### 2.2.1 COMPARACIÓN DE LOS CONSUMOS EV-ICE

Como en el presente proyecto se pretende analizar el vehículo eléctrico con batería convencional se comparará con el vehículo convencional con motor de combustión interna.

#### 2.2.1.1 *La eficiencia energética del vehículo individualmente ("Tank-to-Wheel")*

Se definirá la eficiencia energética "Tank-to-Wheel" como la eficiencia energética del vehículo por sí mismo, es decir el balance entre:

- La energía entrante al sistema, que es la que aporta el combustible (Energía Química) en el caso de ser un vehículo convencional con un motor de combustión interna, o la energía eléctrica aportada al vehículo eléctrico proporcionada a las baterías por la red de distribución en caso de tratarse de un vehículo eléctrico, sin tener en cuenta los consumos de producción ni de la energía eléctrica ni de los combustibles.
- La energía saliente, será la proporcionada por el vehículo a las ruedas del coche.



## Vehículos convencionales

La eficiencia energética de los vehículos convencionales “Tank-to-Wheel” en el mejor de los casos y en condiciones de funcionamiento nominal no supera el 22% para el diésel y el 18% para la gasolina. Es decir tan solo el ~20% de energía química contenida en el combustible es transmitida a las ruedas del vehículo, el resto son pérdidas en forma de calor. Se ha de tener en cuenta que estos valores de eficiencia del vehículo se calculan en condiciones ideales. La eficiencia variará con las condiciones de conducción y tráfico, por lo que las eficiencias reales resultarán ser bastante peores, principalmente en entornos urbanos debido a las congestiones de tráfico.

## Vehículos eléctricos

La eficiencia energética de los vehículos eléctricos “Tank-to-Wheel” oscila entre un 60% y un 70%, teniendo en cuenta el rendimiento de las baterías, los ciclos de carga/descarga y la gestión electrónica de potencia.

Es decir se transmite un ~65% de la energía a las ruedas de la total aportada al vehículo a través de la red eléctrica, el resto, un ~35% se pierde en forma de calor. La eficiencia apenas varía con el estilo y las condiciones de conducción, ya que los motores eléctricos tienen una eficiencia cuasi constante para cualquier velocidad de rotación y los vehículos eléctricos apenas consumen energía a ralentí.

La eficiencia energética de los vehículos eléctricos “Tank-to-Wheel” es en torno a tres veces mayor que la de los vehículos convencionales de combustibles fósiles, en condiciones ideales. Es aún mayor si se compararan las eficiencias en condiciones reales.

Por lo tanto un vehículo eléctrico consume del orden de tres veces menos energía final que cualquier vehículo de combustible fósil (excluyendo los híbridos) tomando como referencia vehículos con peso, tren de transmisión y fricción rueda/carretera, similares.

### *2.2.1.2 La eficiencia energética del ciclo materia prima-vehículo (“Well-to-Wheel”)*

Se definirá la eficiencia energética materia prima-vehículo (“Well-to-Wheel”) como la relación entre la energía final transmitida a las ruedas motrices dividido por la energía

primaria de la fuente de energía (pozo petrolífero, minas...). Es decir igual a la eficiencia individual del vehículo (“Tank-to-Wheel”), anteriormente citada y multiplicada por la eficiencia del proceso de transformación del combustible (“Well-to-Tank”), es decir el paso de materia prima a combustible listo para su uso.

### Vehículos convencionales

La eficiencia energética “Well-to-Tank” (desde la fuente de energía primaria al depósito del vehículo), oscila en torno al 80%. Esto significa que los procesos de producción, refinado y distribución de un litro de combustible suministrado al vehículo consumen el equivalente a un quinto de litro de combustible por litro.

La eficiencia energética “Well-to-Wheel” para un vehículo convencional en el mejor de los casos y en condiciones de funcionamiento nominal es de un 15% para un motor de gasolina y del 18% para uno diésel. La eficiencia energética fuente primaria-transmisión para el caso más favorable en vehículos convencionales es por tanto en torno al 15% (teniendo en cuenta la eficiencia del proceso de producción del combustible junto con el rendimiento de los coches de ciclo Otto) para la gasolina y alrededor de 18% para el diésel (teniendo en cuenta la eficiencia del proceso de producción del combustible junto con el rendimiento de los coches de ciclo Diésel).

En resumidas cuentas, en condiciones ideales de conducción sólo alrededor del 15% para motores gasolina y el 18% en caso de motores diésel de la energía primaria es transmitida a las ruedas, el resto son pérdidas fundamentalmente en forma de calor y procesos de destilado y transporte del combustible.

### Vehículos eléctricos

Como en el caso de los vehículos convencionales considerando en primer lugar la eficiencia “Well-to-Tank”, siendo en este caso el “tank” los puntos de consumo de energía eléctrica, por lo tanto teniendo en cuenta la energía consumida por la producción y distribución de la electricidad, se estima que la eficiencia del proceso es de alrededor de un 37%, aunque dicha eficiencia varía según el tipo de “mix energético”.

Como se ha mencionado anteriormente la eficiencia energética de la producción de electricidad es variable y difícil de estimar, debido a que cada tipo de planta de producción de energía eléctrica tiene una eficiencia singular, para cálculos globales de un sistema se adopta una cifra de alrededor del 40%, sin embargo para cálculos más precisos sería necesario conocer la eficiencia de cada planta y su producción para poder realizar una eficiencia total real de producción del sistema eléctrico a estudiar. Una cifra de alrededor del 40% está sin embargo a menudo considerado como un medio útil para este tipo de cálculo. En otras palabras, sólo alrededor del 40% de la energía primaria que llega a las planta de producción de energía eléctrica se convierte en electricidad. La eficiencia de distribución y transporte de la energía es del 90%, de ahí el ~37% de eficiencia del proceso “Well-to-Tank”.

Teniendo en cuenta que la eficiencia “Tank-to-Wheel” para los vehículos eléctricos con baterías plomo-ácido es del 60% y del 72% para aquellos con baterías de litio resulta que la eficiencia energética los vehículos eléctricos “Well-to-Wheel” (fuente primaria – transmisión), es:

- alrededor del 22% ( $60\% * 37\%$ ) para vehículos eléctricos con baterías de plomo-ácido,
- alrededor del 27% ( $72\% * 37\%$ ) para vehículos eléctricos con baterías de litio.

Resumiendo, y en atención a lo descrito en esta sección, se puede afirmar que en condiciones nominales de funcionamiento la eficiencia energética “Well-to-Wheel”, es decir, el balance global de eficiencia resulta ser:

Para el caso de un vehículo eléctrico con baterías de plomo-ácido, la eficiencia será:

- 1,2 veces mayor que un vehículo diésel.
- 1,5 veces superior que un vehículo de gasolina.

En el caso de tratarse de un vehículo eléctrico con baterías de litio, la eficiencia es:

- 1,5 veces superior que la de un vehículo diésel.
- 1,8 veces mayor que la un vehículo de gasolina.

En condiciones de tráfico reales, estas relaciones son aún mayores.

## 2.2.2 Comparación de las emisiones de $CO_2$ EV-ICE

Las emisiones generadas por los vehículos eléctricos en un país dependen del mix energético del país. Cabe destacar dos escenarios actuales presentes en la UE:

- Los países cuyo mix energético está formado principalmente por fuentes de energía renovable o nuclear, y por lo tanto sistemas energéticos que generan muy bajas emisiones de  $CO_2$ . Este es el caso de países como Noruega, Suecia y Francia. En este caso los vehículos eléctricos están cercanos a emisión cero de  $CO_2$ .
- Países cuyo mix energético está formado principalmente por centrales térmicas convencionales, lo que supone unas emisiones medias de 1000 g  $CO_2$  / kWh. En este caso las emisiones de  $CO_2$  “Well-to-Wheel” de un vehículo eléctrico son incluso mayores que las de un vehículo convencional. Este es el caso en países como Luxemburgo y Polonia.

El caso de España los valores de emisiones de  $CO_2$  se sitúan en torno a los 300 g  $CO_2$  /kWh [7] con este dato de emisiones de producción del “mix energético” español, las emisiones de  $CO_2$  “Well-to-Wheel” de un coche eléctrico en España resultarían ser del orden de tres veces menores que las de un vehículo convencional con el mismo peso y el rendimiento [8]:

- Las emisiones de  $CO_2$  de un coche diésel serán 2,9 veces mayores que las emisiones de  $CO_2$  de un coche eléctrico con baterías de plomo-ácido.
- Las emisiones de  $CO_2$  de un coche de gasolina serán 3,1 veces superiores que las emisiones de  $CO_2$  de un coche eléctrico con baterías de plomo-ácido.
- Las emisiones de  $CO_2$  de un coche diésel son 3,4 veces mayores que las emisiones de  $CO_2$  de un coche eléctrico con baterías de litio.
- Las emisiones de  $CO_2$  de un coche de gasolina son 3,7 veces superiores que las emisiones de  $CO_2$  de un coche eléctrico con baterías de litio.

# **CAPÍTULO 3**

BATERÍAS Y ESTACIONES DE CARGA

## 3 BATERÍAS Y ESTACIONES DE CARGA

### 3.1 Tecnologías de baterías

Técnicamente hablando, la batería es el área donde se han producido las principales mejoras, aunque no han sido aún las deseadas. Las baterías comercialmente disponibles, tales como Ni-Cd o Ni-hidruro metálico en el mejor de los casos pueden almacenar el doble de la energía de una batería convencional de Pb, las de Na de alta temperatura y NCl pueden llegar a triplicar la energía almacenada. Las baterías de Zn-aire tienen un potencial de almacenamiento de energía siete veces superior al de las baterías de Pb.

Sin embargo estas baterías aun no son competitivas ya que tienen un precio muy elevado, no obstante hay indicios de que el precio caerá considerablemente en el futuro.

Para reemplazar el equivalente a 45 litros de gasolina que daría a un vehículo una autonomía de 450 km, sería necesario una batería de litio de 800 kg, una amplia mejora respecto a los 2,700 kg necesario para el caso de contar con una batería de plomo ácido, aun así sigue siendo una batería grande y pesada.

La tecnología todavía no permite el diseño de vehículos con una amplia autonomía. En la práctica, la disposición batería recargable con la energía específica más alta es la batería de polímero de litio que tiene una energía específica acerca de tres veces la de plomo-ácido.

#### 3.1.1 Baterías ión-litio

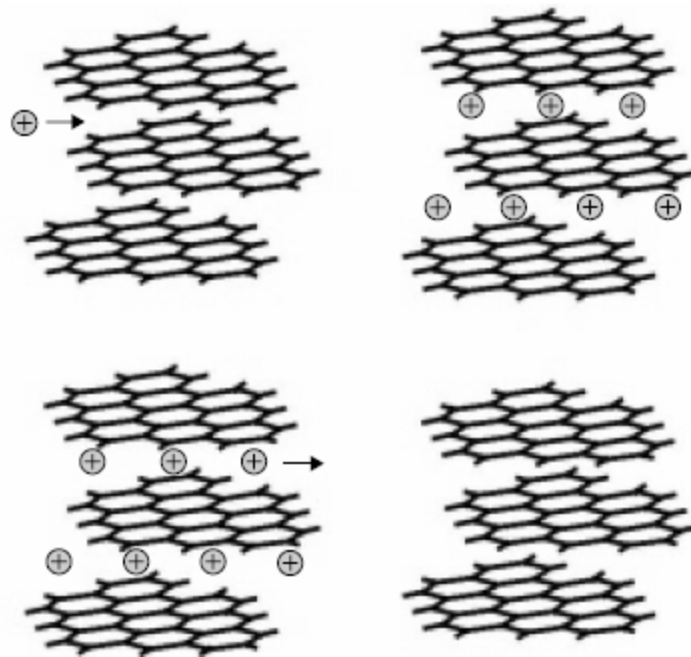
Las baterías de ion litio se desarrollaron para aprovechar la alta densidad de energía de las células de Li. La utilización de ciertos materiales de carbono como el material del cátodo ha de superar algunas de las limitaciones y problemas de seguridad que surgen de la recarga de electrodos de Li metal.

Las baterías de litio se fueron comercializadas por primera vez por Sony en 1991. Desde entonces, el desarrollo de la tecnología de estas baterías no ha cesado, y se ha visto un enorme aumento en el uso en dispositivos portátiles como reproductores de música, cámaras, móviles, y, más recientemente, en vehículos eléctricos.

El cátodo de las baterías de Ión-Litio suele estar compuesta de grafito, coque, o carbono "duro". Actualmente en algunos casos se emplea un elemento no compuesto por carbono que es el Tinanato de Litio.

Para el ánodo de las baterías de Litio se emplean óxidos de compuestos metálicos de o fosfatos. Tales como el óxido Litio-Cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) o el Fosfato Litio-Hierro ( $\text{LiFePO}_4$ ).

Estas baterías o celdas de litio ion funcionan mediante un mecanismo químico llamado intercalación en donde los iones de litio se insertan en la estructura molecular de los materiales de los electrodos. Cuando el electrodo negativo de una célula de ion Li se reduce electroquímicamente durante el proceso de carga, los iones de litio ( $\text{Li}^+$ ) se insertan entre las capas de grafito individuales. El proceso de intercalación de las celdas de Li ión se muestra en la siguiente figura.



*Fig. 5. Modelo de funcionamiento de una celda Ion-Litio (Intercalación, Desintercalación). [9]*

Durante la descarga de la batería sucede el proceso inverso, los iones de  $\text{Li}^+$  salen de las intercalaciones, de los cátodos de carbono. Todo el ciclo de carga-descarga deja la estructura del grafito intacta y disponible para repetir el proceso de intercalación-desintercalación para futuros procesos de carga y descarga de la batería.





Se añade un término relativo a la tensión de polarización para representar mejor el comportamiento de la tensión en circuito abierto (OCV). El voltaje de la batería viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{batería} = E_0 - K * \frac{Q}{Q-it} * it - R * i + A * e^{(-B*it)} - K * \frac{Q}{Q-it} * i^* \quad (1)$$

Donde:

$V_{batería}$ : Voltaje de la batería (V)

$E_0$ : Constante del voltaje de la batería (V)

$K$ : Constante de polarización (V/Ah) o resistencia de polarización ( $\Omega$ )

$Q$ : Capacidad de la batería (Ah)

$it$ :  $\int idt$  : Carga actual de la batería (Ah)

$R$ : Resistencia interna ( $\Omega$ )

$i$ : Corriente de la batería (A)

$A$ : Amplitud (V)

$B$ : Constante inversa exponencial del tiempo (Ah)<sup>-1</sup>

$i^*$ : Corriente filtrada (A)

Este modelo emplea una corriente filtrada ( $i^*$ ) que fluye a través de la resistencia de polarización. Esta corriente filtrada se usa para resolver también el problema de bucle algebraico debido a la simulación de sistemas eléctricos en Simulink. Además, el OCV varía de forma no lineal con el SOC. Este fenómeno se modela por la polarización de voltaje.

La zona exponencial de la ecuación es válida para las baterías Ión-Litio. Para las otras baterías (plomo-ácido, NiMH y NiCd), existe un fenómeno de histéresis entre la carga y la descarga, sin importar el estado de carga de la batería (SOC).

### 3.2.2 El modelo de carga

El modelo de carga, en particular el comportamiento al final de la carga (EOC), es diferente y difiere en función del tipo de batería. Las baterías de Plomo-ácido e Ión-Litio tienen las mismas características de EOC, debido a que el voltaje aumenta rápidamente cuando la batería alcanza la carga completa. Este fenómeno se modela mediante la resistencia de polarización. En el modo de carga, la resistencia a la polarización aumenta hasta que la batería está casi completamente cargada ( $it = 0$ ). Por encima de este punto, la resistencia a la polarización aumenta exponencialmente.

A diferencia del modelo de resistencia a la polarización de la descarga, la resistencia a la polarización es ahora:

$$Pol. Resistencia = K * \frac{Q}{it} \quad (2)$$

En teoría, cuando  $it = 0$  (caso en el que la batería está completamente cargada), la resistencia de polarización es infinita. Esto no es exactamente así en la realidad, los resultados experimentales han demostrado que la contribución de la resistencia de polarización se desplaza en torno a un 10% de la capacidad de la batería. Luego la ecuación se reformulará como:

$$Pol. Resistencia = K * \frac{Q}{it - 0.1 * Q} \quad (3)$$

Al igual que en el modelo de descarga, el voltaje exponencial para la batería de Ión-Litio es  $A * e^{(-B*it)}$ .

### 3.2.3 Modelo carga-descarga

El modelo completo de carga es similar al de la siguiente figura. Sólo difiere el cálculo de  $E_{batt}$ , dependiendo del tipo de Batería, en el caso de una batería Ión-Litio:

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{it - 0.1Q} * i^* - K \frac{Q}{Q - it} * it + A * e^{(-B*it)} \quad (4)$$

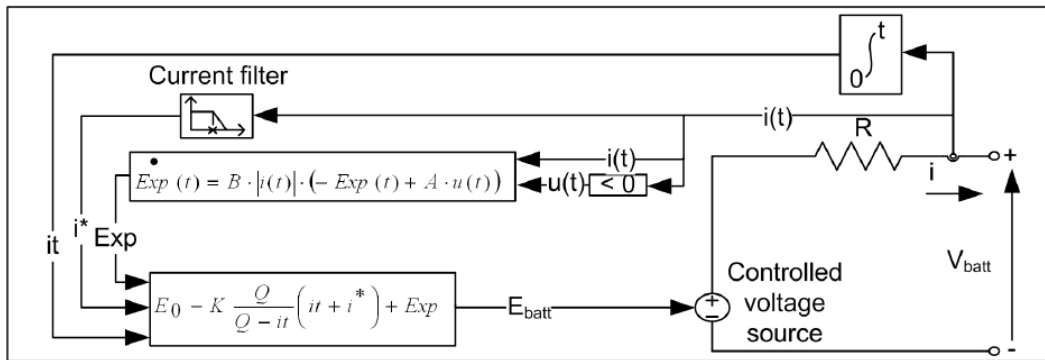


Fig. 7. Modelo de carga-descarga de la batería. [10]

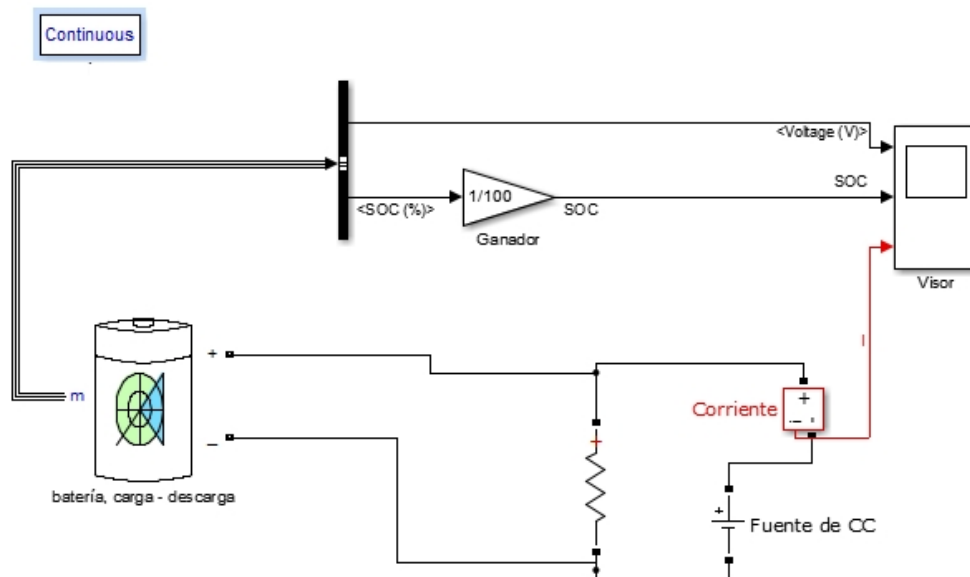


Fig. 8. Modelo en Simulink de carga y descarga de la batería.

### 3.3 Modelo de estación de carga del vehículo eléctrico

### 3.4 Modelo de convertidor (rectificador)

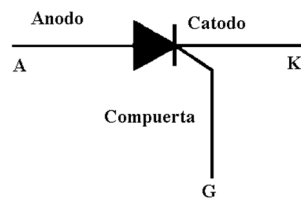
La conversión de potencia se encarga del proceso de conversión de energía eléctrica, ya sea AC-DC, DC-AC, AC-AC o DC-DC. Los aparatos electrónicos que realizan la conversión de energía se denominan convertidores de potencia. Dichos aparatos electrónicos

no contienen partes en movimiento, luego se les denomina como convertidores estáticos de potencia.

La conversión de energía se consigue utilizando elementos semiconductores como interruptores. Los dispositivos de potencia utilizados son los SCR, triacs, transistores de potencia, MOSFET, transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), y MCT (tiristores controlados MOS).

### 3.4.1 Convertidor AC-DC [11]

Los convertidores AC-DC son los denominados de controladores fase controlada, los cuales son capaces de convertir una corriente alterna de amplitud y frecuencia variable en corriente continua (variable). Generalmente para la conversión de corriente alterna, en corriente continua se emplean los SCR (Rectificador Controlado de Silicio).



*Fig. 9. Esquema de un SCR.*

El valor medio de la tensión de salida se controla variando el tiempo de “conducción” de los SCR (tiempo que permanece el circuito cerrado y por lo tanto conduciendo). El encendido del SCR se realiza mediante pulsos a través de la compuerta (G). El apagado se realiza mediante la conmutación de corriente desde un dispositivo a otro en el instante en el que la tensión de entrada (AC) tiene un mayor potencial instantáneo que el de la onda de salida (DC). En los SCR hay una tendencia natural que hace que la corriente sea conmutada desde el saliente al SCR entrante, sin la ayuda de otro circuito de conmutación externa.

Para un circuito que convierta corriente trifásica alterna en corriente continua es necesario seis SCR (seis tiristores).

### 3.4.1.1 Convertidor trifásico (6 SCRs)

El circuito rectificador de corriente alterna trifásico se muestra en la siguiente imagen, está formado por seis tiristores (SCRs).

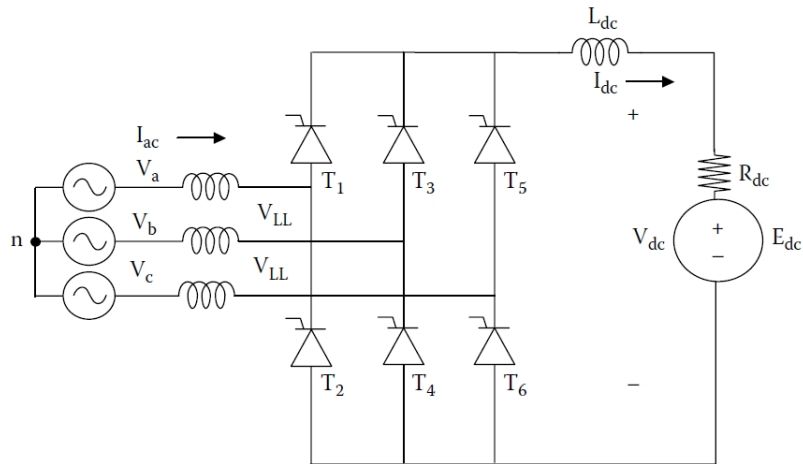


Fig. 10. Circuito rectificador trifásico (AC-DC) [12]

En un instante de tiempo cualquiera, se activa uno de los tiristores T1, T3 y T5 y otro de los T2, T4, T6 en la secuencia adecuada, mientras la tensión de fase de la corriente alterna pasa de positivo a negativo.

Cada una de las tres fases da dos pulsos, lo que hace un total de seis pulsos a la salida del SCR. Cada tiristor conduce durante  $120^\circ$  de cada ciclo. En la siguiente imagen se ve la corriente rectificada con un ángulo de retraso de  $15^\circ$ , ya que en la realidad los tiristores no conducen los  $120^\circ$  en cada ciclo, a ese desfase angular se le denomina ángulo de retraso.

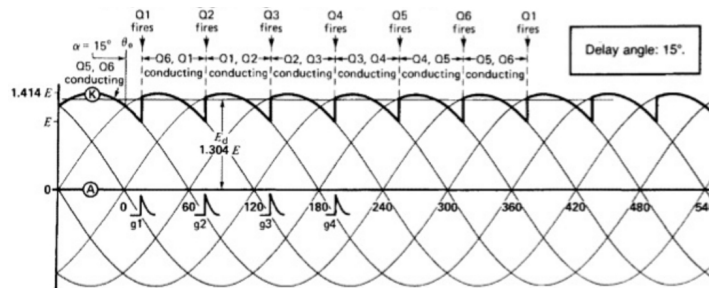


Fig. 11. Corriente trifásica rectificada.

### 3.5 La estación de carga

El estado actual de la técnica de carga de baterías para vehículos eléctricos consta fundamentalmente de cuatro *modos de carga conductiva* y dos *modos de carga inductiva*. En los apartados siguientes se hará una breve descripción de estas tecnologías y de los equipos principales integrados en la puesta en marcha de las mismas.

#### 3.5.1 Modo 1 de carga

En el *modo 1 de carga*, la conexión del vehículo eléctrico a la red de corriente alterna se realiza mediante conexiones estandarizadas, es decir, que cumplan los estándares tanto nacionales como internacionales, dichas conexiones suministran corrientes de hasta 16 A [13].

Estas estaciones de carga corresponden a infraestructuras tales como tomas domésticas, a la que los vehículos eléctricos están conectados para cargar. Estas tomas de corriente pueden entregar fácilmente y de forma económica la potencia deseada, y debido a su disponibilidad, este modo de carga es la opción más común para los vehículos eléctricos.

Sin embargo, este tipo de carga tiene asociados una serie de problemas de seguridad que han de tenerse en cuenta. Para una carga segura en una estación de carga de este tipo (Modo 1), la estación ha de contar con las protecciones adecuadas del lado de abastecimiento: un fusible o disyuntor de protección contra sobrecorriente, una toma a tierra, y un dispositivo de corriente residual (RCD) que desconectará la alimentación si se detectara una corriente de fuga de un cierto valor.

Sin toma de tierra, se podría dar lugar a una situación de peligro debido al contacto indirecto, como se muestra en la siguiente imagen.

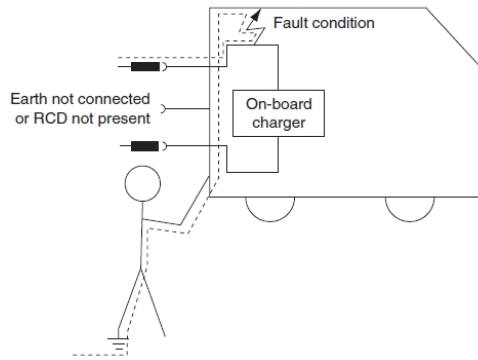


Fig. 12. Riesgo de contacto indirecto, al no disponer de tomar tierra

En la mayoría de los países, los dispositivos de corriente residual son obligatorios en todas las nuevas instalaciones de carga de vehículos eléctricos. Sin embargo, debido al desconocimiento de los usuarios sobre la presencia de los RCD al enchufar el vehículo eléctrico supone un peligro potencial. Debido a ello, los fabricantes de vehículos tienden a alejarse de este modo de carga a largo plazo.

### 3.5.2 Modo 2 de carga

En este modo de carga, la conexión del vehículo eléctrico a la red de corriente alterna se hace también mediante el uso de tomas de corriente estándar, pero a diferencia del modo 1 existe una protección adicional, proporcionada mediante un elemento de control entre el vehículo eléctrico y la toma de corriente. A continuación se muestra el elemento de control que se emplea en este modo de carga:

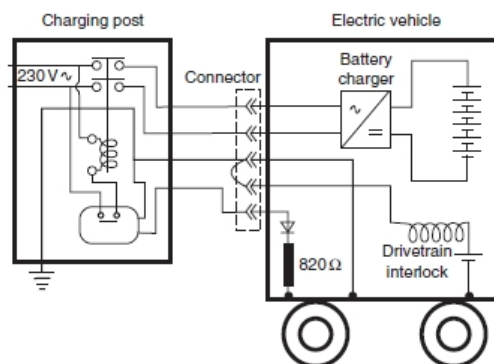


Fig. 13. Elemento de control para estaciones de carga modo 2 y 3.

La introducción del modo 2 de carga, se desarrolló a continuación del modo 1, con el fin de garantizar al máximo la protección de los usuarios y de la propia instalación de carga. Este modo se consideró inicialmente una solución de transición para sustituir el modo 1 de carga en puntos de carga no dedicados (“gasolineras eléctricas”).

La principal desventaja de este modo es que el elemento control protege el cable aguas abajo y el vehículo, pero no la propia toma de corriente, siendo la toma de corriente uno de los componentes más susceptibles de ser dañados durante el proceso de carga.

### 3.5.3 Modo 3 de carga

En el *modo 3 de carga* la conexión vehículo eléctrico es directa a la red eléctrica y se realiza mediante la utilización de equipos de carga específicos para vehículos eléctricos. Este modo de carga son las estaciones de carga públicas o privadas. Existe una norma (IEC61851-1) que regula la protección entre los equipos conectados permanentemente a la red de abastecimiento y el vehículo eléctrico.

La norma prevé medidas de protección adicionales que serán proporcionadas por el elemento de control llamado piloto de control, el dispositivo de control tiene las siguientes funciones:

- Verificar que el vehículo esté correctamente conectado
- Verificar de forma continua la integridad de los elementos de protección
- Energizar y desenergizar el sistema
- Posibilitar la selección de velocidad de carga

Existen actualmente dispositivos alternativos de control al piloto de control, que incluyen varios sistemas de transferencia inalámbrica de datos, así como la comunicación con la línea eléctrica. Un ejemplo muy interesante ha sido desarrollado por Electricité de France (EDF), y es el que se muestra a continuación:



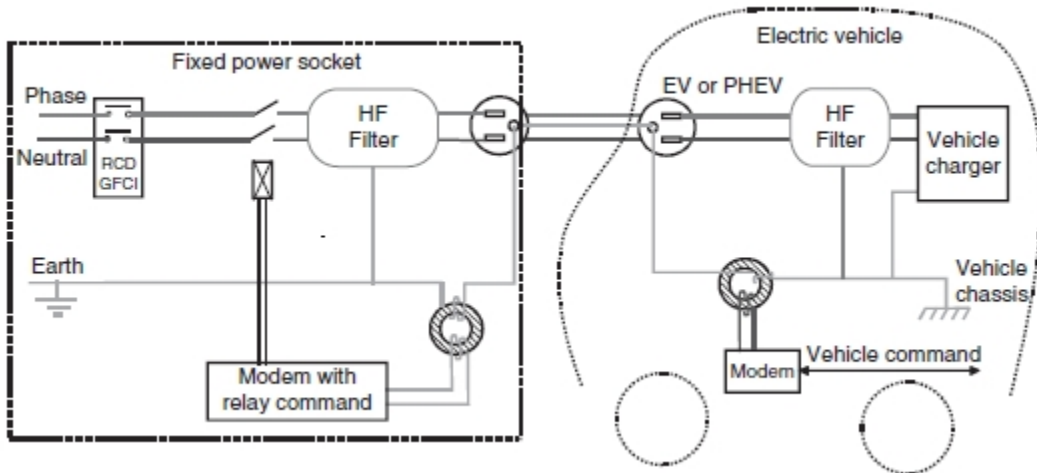


Fig. 14. Dispositivo de control con comunicación con la red eléctrica

El sistema presenta varios aspectos interesantes, ya que es capaz no sólo de llevar la señal al piloto de control, sino también lleva a cabo funciones de intercambio de datos entre la estación de carga, la red y el vehículo, que puede utilizarse en la carga inteligente y facturación por parte de la compañía eléctrica.

### 3.5.4 Modo 4 de carga

Este modo de carga es en el cual la conexión del vehículo eléctrico a la red se realiza de manera indirecta mediante el uso de un cargador externo, donde el elemento de control está conectado a los equipos permanentemente conectados a la red de suministro.

Este tipo se refiere a estaciones de carga de corriente continua (CC), que son las que se utilizan para las cargas rápidas. El cargador se encuentra fuera del vehículo, y se necesita continua comunicación entre el vehículo (batería) y el cargador acerca del estado de carga, con el fin de suministrar la tensión y corriente adecuada.

## 3.6 Comunicación, vehículo-estación de carga

La comunicación entre el vehículo y el punto de carga puede ser de varias formas. En el Modo 1 o Modo 2 de carga, donde se utilizan enchufes estándar, (“puntos de carga no dedicados”), no hay comunicación.

### 3.6.1 El piloto de control como elemento de comunicación

El Modo 3 de carga permite la comunicación entre vehículo eléctrico, usuario y red de alimentación a través del piloto de control. Durante su estado básico de funcionamiento, el piloto de control sólo cumple con sus funciones de seguridad esenciales. La señal es tan solo una corriente enviada a través del piloto de control para asegurar que el vehículo esté correctamente conectado y la conexión a tierra es correcta.

Se puede aumentar el nivel de comunicación y por tanto de seguridad mediante el uso de pulsos en el circuito de control del piloto (PWM). La señal PWM puede transmitir información a través de la variación de su ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo se puede utilizar para definir la capacidad de corriente del cargador. El empleo de estos pulsos permite garantizar ventajas operativas:

- El cargador puede ajustarse a la corriente máxima admisible de suministro de los puntos de recarga, como por ejemplo, un valor estándar de 16A y un valor más alto de 32 A para puntos de recarga semi-rápidos.
- El punto de recarga puede controlar la corriente absorbida por el cargador, realizando una gestión de la carga de manera inteligente e integrada, y permitiendo optimizar la facturación de la energía eléctrica “consumida”.

### 3.6.2 Cargadores “off board”

Este tipo de cargadores “Off Board” son los empleados en el Modo 4, suministran una corriente continua a la batería del vehículo. Dichos cargadores deben comunicarse con el vehículo eléctrico con el fin de suministrar el voltaje y la corriente correcta a la batería. Siendo especialmente necesario en el caso de puntos de carga no dedicados, ya que a diferencia de estaciones de carga dedicadas, no son capaces de suministrar los diferentes rangos de voltajes necesarios en función del tipo de vehículo eléctrico.

### 3.6.3 Comunicación para la gestión de la red “smart grid”

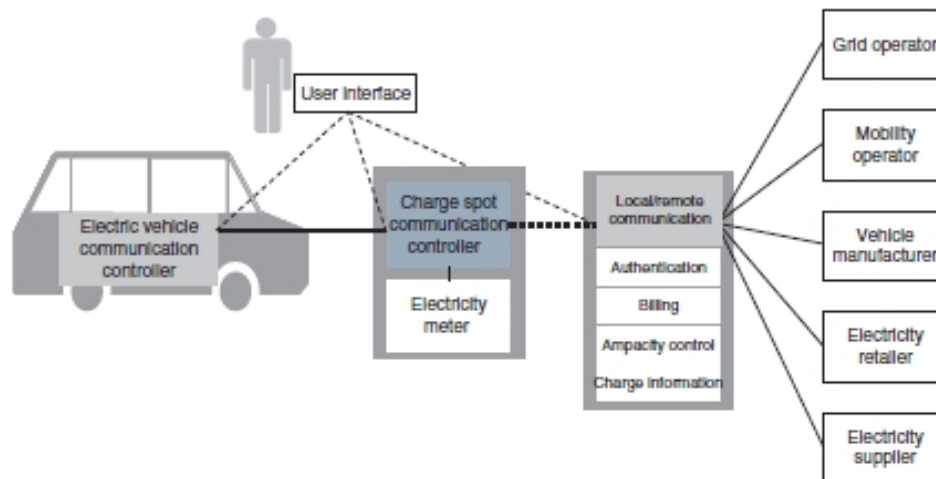
Del desarrollo del nuevo concepto "Smart Grid" o "Vehicle to Grid" ha surgido la necesidad de un nuevo protocolo de comunicación apropiado para la carga de vehículos eléctricos, más allá de las funciones de seguridad ejercidas por el piloto de control. Con estos nuevos protocolos de comunicación se pretende:

- La identificación del vehículo y de facturación, lo que permite el pago de la carga correspondiente en las estaciones de carga pública, además también se pretende establecer un sistema para realizar una facturación individual de cuando el vehículo se carga en puntos de carga no dedicados, posible gracias a contadores inteligentes implantados en la red.
- Optimización del coste de carga de los vehículos al elegir el escenario más propicio, cuando las tarifas eléctricas sean las más bajas y por tanto las demandas menores (horas valle). Gracias a ello también se lograra un “aplanamiento” de la curva de demanda que además de estabilizar los precios genera beneficios operativos en la red.
- Optimización de la carga, mediante el control de corriente máxima admisible del cargador en función de la demanda de la red
- Utilización de los vehículos eléctricos conectados a la red como una reserva de energía (vehículo-to-grid), es decir cesión de energía en horas pico, para lo que se ha mencionado anteriormente “aplanamiento” de la curva de demanda y mejorar la operatividad del sistema eléctrico.
- Implementar compensaciones y sistemas de facturación adecuados los usuarios de vehículos eléctricos.

El desarrollo de los protocolo de comunicación para desarrollar el concepto de Smart Grid requiere de la ayuda de los fabricantes de vehículos, las instituciones públicas y de los usuarios. La estandarización está siendo abordada por tres comités técnicos:

- ISO TC22 SC3 (Equipamiento de los vehículos eléctricos de carretera , incluidos los sistemas de comunicaciones “on board”)
- ISO TC22 SC21 (Organización Internacional de la Estandarización, comité del vehículo eléctrico)
- IEC TC69 (Comisión Electrotécnica Internacional del vehículo eléctrico).

Los protocolos de comunicación se basan en el sistema abierto OSI. El sistema de comunicación puede tener la función de autenticación, la recolección y consolidación de parámetros de la red y facturación para los usuarios, así como la transmisión de la información del proceso de carga. No todas estas funciones son necesarias en las funciones básicas de carga, y algunas pueden ser realizadas de forma local o remota.



*Fig. 15. Sistema de comunicación y los elementos que lo componen*

Un ejemplo típico del proceso conexión y carga puede ser tal como:

1. El usuario conecta su vehículo en el punto de carga sin tener que realizar ninguna otra acción.
2. El vehículo envía su ID de identificación al punto de carga para obtener la autenticación de la cámara a través del sistema de control.

3. Una vez la autenticación se procesa correctamente, se establecen los parámetros de red (para proceso de carga) y la tarifa (para la facturación).
4. El proceso de carga se inicia automáticamente.

Con el fin de definir los mensajes de comunicación, cada uno de estos pasos se traduce en un diagrama de secuencia en lenguaje unificado. Aún no se ha realizado en este campo una estandarización de las señales, en visión de una norma general que abarque todos los protocolos y que permita una solución global.

#### 3.6.4 Comunicaciones en el proceso de facturación

La carga de vehículos eléctricos en estaciones de carga públicas plantea el problema de la facturación al usuario por la energía consumida.

Dado que el coste de la electricidad suministrada durante una sesión de carga suele ser bastante más bajo que el coste de estacionamiento en el entorno del centro de la ciudad, se puede considerar a cobrar al usuario de acuerdo con el tiempo en lugar de la energía suministrada, además se prescinde de la necesidad de contadores de electricidad.

Los nuevos desarrollos en el área de las comunicaciones permitirán un enfoque más sofisticado, y que permitirá:

- Identificación de usuario
- Comunicación mediante dispositivos inalámbricos (vehículo-usuario-red)
- Diferenciación de la facturación según el tiempo de la carga de día y del punto de carga (“grid to vehicle”)
- Compensación por la energía devuelta a la red (“vehicle to grid”).

#### 3.7 Conexión vehículo - estación de carga: equipamiento

La conexión entre el vehículo y el punto de carga puede llevarse a cabo de tres maneras como se define en IEC 61851-1:

## CASO A

El cable y el punto de carga están unidos de forma permanente al vehículo. Este caso es generalmente para vehículos ligeros.

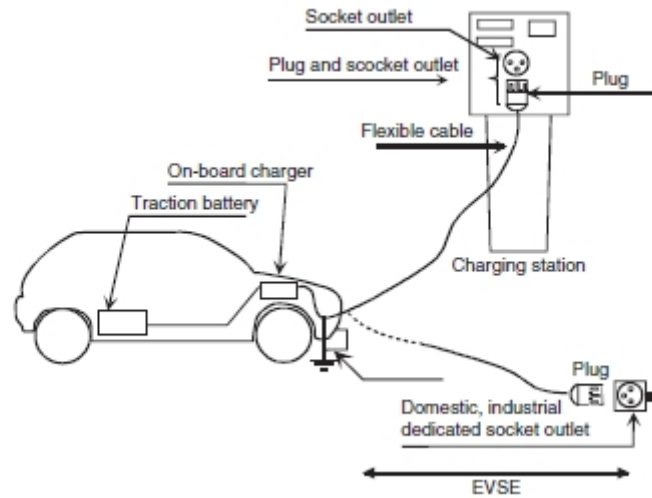


Fig. 16. Conexión tipo caso "A"

## CASO B

El cable es desmontable y está conectado al vehículo con un conector. Este es el caso más común para los tipos de carga normal y semirápida.

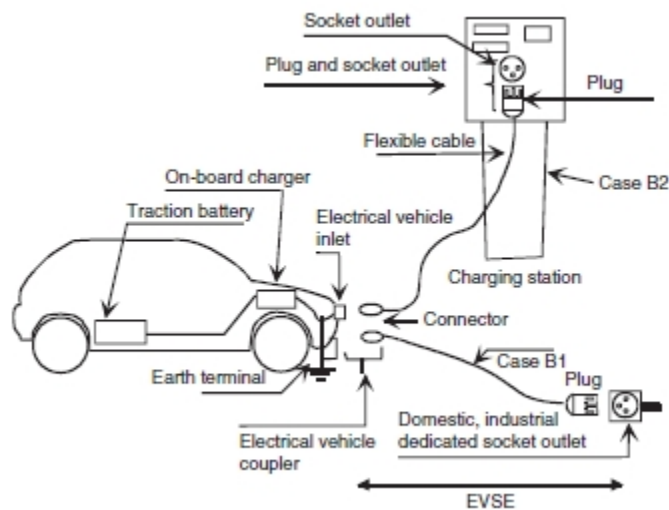
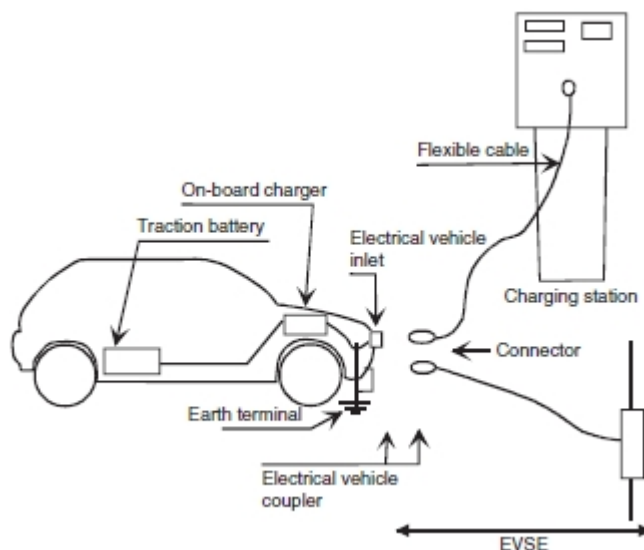


Fig. 17. Conexión tipo caso "B"

## CASO C

El cable y el vehículo están unidos permanentemente al equipo de suministro. Esta disposición se utiliza normalmente para la carga rápida (modo 4).



*Fig. 18. Conexión tipo caso "C"*

### 3.7.1 Accesorios normalizados (solos modos 1 y 3)

En los modos 1 y 3 de carga, con comunicación de la línea eléctrica, enchufes y tomas de corriente estándar se pueden utilizar, únicamente fase, neutro y toma tierra. Lo cual suele ser similar a los enchufes domésticos estándar descritos en las diversas normas nacionales (10-16 A).

Sin embargo estos enchufes domésticos, no son adecuados para la carga de vehículos eléctricos no ligeros es decir que lleven una carga considerable , ya que esto conduce a una vida útil más corta de los accesorios y puede derivar en situaciones peligrosas.

Una mejor alternativa es usar tomas de corriente industriales según la norma internacional IEC 60309-2. Estos elementos eléctricos son ampliamente utilizados, sobre todo en Europa, para equipos industriales. Funcionan en un modo comparable a una estación de carga de vehículos eléctricos Estos accesorios son fáciles de encontrar en el mercado y

además tiene un bajo coste , por lo que son la opción preferida para los Modos 1 y 3 de carga; ( donde se utiliza la comunicación de la línea eléctrica).

### 3.7.2 Accesorios específicos

El uso de un piloto de control físico exige la introducción de accesorios específicos para el uso estaciones de carga del vehículo eléctrico. Tales elementos se describen en la norma internacional IEC 62196. "Enchufes, tomas de corriente, acopladores de vehículos y Carga conductiva de los vehículos eléctricos"

#### *Los primeros modelos*

Los primeros acoples para vehículos eléctricos fueron fabricados por la empresa Maréchal en la década de 1990.

Este acoplador estaba previsto tanto para el modo de carga 3 (AC) a 230 V y 16A, como para el modo 4 (CC) a 200 A. Una toma del vehículo daba cabida a los conectores, tanto en una versión ligera (AC) como a la versión más pesada de carga (CC). Sin embargo, a pesar de su relativo amplio uso, nunca fue adoptado como estándar.

#### *Adaptación a los estándares*

Un conector que pueda funcionar en los modos 1 y 3 de carga ha sido propuesto por la empresa alemana Mennekes. Haciendo uso de la norma IEC 60309-2. Un vehículo puede por lo tanto cargar en el modo 1 en una toma de corriente no dedicada (por ejemplo, garaje privado) y en el modo 3 en una estación de carga pública.

Este sistema está usándose en Alemania y Suiza.

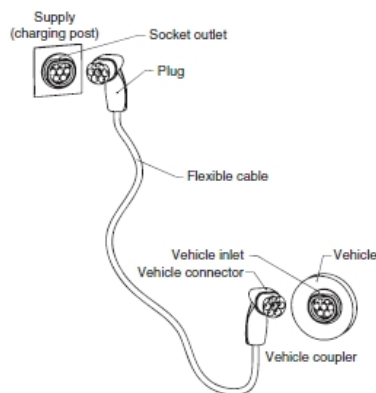
#### *Nuevas propuestas de normalización*

Con el nuevo interés por los vehículos eléctricos de batería eléctrica y los vehículos híbridos, los trabajos de normalización han comenzado para lograr un diseño global de los acoplamientos que se utilizarán para todos los vehículos eléctricos.



Sin embargo existe la propuesta de tres diseños distintos para el enganche del vehículo, que reflejará la norma IEC 61982-2:

- Conector de una sola fase. La primera propuesta es la solución que se basa en las propuestas de la SAE J1772 y en una propuesta presentada por la empresa japonesa Yazaki. Este enchufe está diseñado para trabajar en tensiones de 250V y corrientes de 32A. Está equipado con dos contactos adicionales: uno para el piloto de control (CP) y una para un contacto auxiliar del acoplador (CS) que se puede utilizar para indicar la presencia del conector del vehículo y para señalar la inserción correcta del conector del vehículo en la entrada del vehículo.
- Conector de corriente trifásica. El conector anteriormente propuesto es monofásico. Las ventajas de las conexiones trifásicas y la disponibilidad de alimentación trifásica en la mayoría de los países europeos, llevaron a una segunda propuesta basada en un prototipo desarrollado por la compañía alemana Mennekes. El conector está diseñado para corrientes de hasta 63 A y tiene dos contactos auxiliares. Una característica interesante de esta propuesta es que el mismo dispositivo puede ser utilizado tanto como enchufe como conector del vehículo, si las normas nacionales permiten tal uso.



*Fig. 19. Conector trifásico propuesto ("Vehicle to Grid")*

- Enchufe Italiano Estandarizado Nacional. Basada en la primera edición de la norma IEC 62196-1, se redactó una norma nacional en Italia para diseñar un enchufe monofásico con contacto piloto. Estos accesorios son de uso generalizado en Italia, en particular para vehículos eléctricos ligeros tales como motocicletas. También se propone una versión trifásica de este elemento.

### Conectores de la batería

Los conectores de batería están ampliamente estandarizados, sobre todo para su uso en vehículos eléctricos industriales. Los requisitos funcionales se dan en la norma europea EN 1175-1.

Existen varias familias de conectores conformes con este estándar, tales como los Euroconectores, o los "Anderson". Estos conectores están disponibles con o sin contactos auxiliares, para CC con intensidades de hasta 350 A.

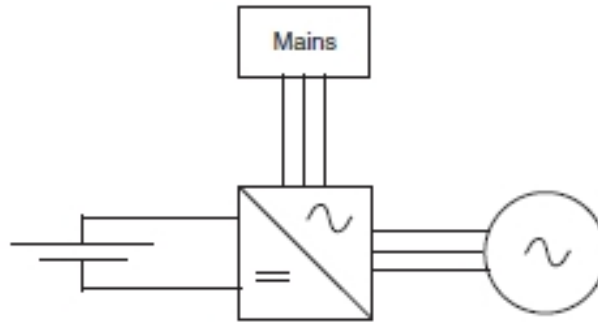
Aunque este tipo de conectores se encuentran a veces en vehículos eléctricos de carretera (convencionales), no es aconsejable su uso para el modo 4 de carga, sobre todo para usuarios convencionales. Ya que no están diseñados para los actuales niveles de voltaje más elevados, ni para la conexión del cable. Además, carecen de conductores de tierra, suponiendo un riesgo elevado para los usuarios no cualificados.

## 3.8 Sistema de carga rápida

Para realizar la carga rápida se requieren niveles de potencia más altos, surgiendo la necesidad de una infraestructura específica más allá de puntos estándar domésticos o dedicados. La carga se puede realizar ya sea en C.C o en A.C.

En el caso de C.C, un rectificador está conectado a la batería, y por lo tanto se necesita infraestructura fija más pesada y costosa, mientras que para A.C. la carga rápida se realiza

“on board”, usando el convertidor que es capaz de recargar la batería mediante el frenado regenerativo o también alimentándose por la red.



*Fig. 20. Carga rápida con equipo inversor*

Se han propuesto infraestructuras de carga rápida tipo para potencias de hasta 250kW, que son capaces de cargar un vehículo eléctrico en menos de 10 minutos, comparable con el tiempo de recarga de combustible de un vehículo con motor de gasolina.

Esta carga rápida tiene sin embargo una serie de inconvenientes:

- Alto costo de la infraestructura en comparación con la necesaria para cargas semirápida
- Necesidad de cables pesados, que a efectos prácticos suelen ser fijos a la estación de carga (caso "C")
- La elevada carga en la red de distribución si se introducen cargas puntuales de este nivel (elevada potencia), y el alto costo de la energía eléctrica sobre todo en las horas punta. Esto puede ser compensado con un reservorio de energía tal como una batería en la estación de carga (que haya sido cargada durante horas valle), aunque tal solución aumenta el coste de inversión e introduce pérdidas adicionales debido a las eficiencias batería-cargador.

- El ciclo de carga rápida no permite la carga total de la batería ya que para ello se necesita un cierto tiempo de alimentación con bajas intensidades.

La presencia y la disponibilidad de estaciones de carga rápida sin embargo proporcionan una ventaja psicológica a los conductores de vehículos eléctricos, lo que les permite explotar al máximo el potencial del vehículo eléctrico y permite superar la barrera de la autonomía. Unas pocas estaciones de carga pero bien situadas en zonas urbanas pueden satisfacer esta necesidad. La conexión de alta potencia de la estación de carga "rápida", además, hace que sea particularmente interesante para aplicaciones de "vehículo to grid".

### 3.9 Carga inductiva

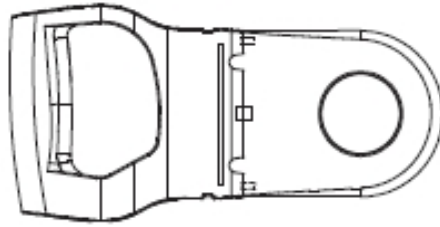
La carga inductiva transfiere la energía desde la red de abastecimiento al vehículo electromagnéticamente, utilizando un transformador de dos partes. Dicho transformador tiene el primario conectado a la red y el secundario al vehículo. La carga se puede realizar después de yuxtaposición de las dos partes.

La introducción de los sistemas de carga inductiva se han propuesto principalmente para permitir una mejora de la seguridad del proceso. La transferencia de energía electromagnética elimina cualquier riesgo de descarga eléctrica para los usuarios. Además, al prescindir de la utilización de cables eléctricos, elimina los peligros que se asocian generalmente con el uso de equipos de carga de vehículos eléctricos.

#### 3.9.1 Carga inductiva por paletas

Un tipo de carga inductiva que ha sido ampliamente introducida ha sido la carga inductiva por paletas, promovida por General Motors en la década de los 90.

Las bobinas del secundario se arrollan en torno a una ranura en el vehículo, siendo una paleta de la bobina primaria la que se inserta en la ranura. El sistema es capaz de dar cabida a los tres niveles de carga.



*Fig. 21. Paleta de cargador inductivo*

En la siguiente figura se muestra la conexión de un vehículo eléctrico cargando su batería inductivamente con este sistema:



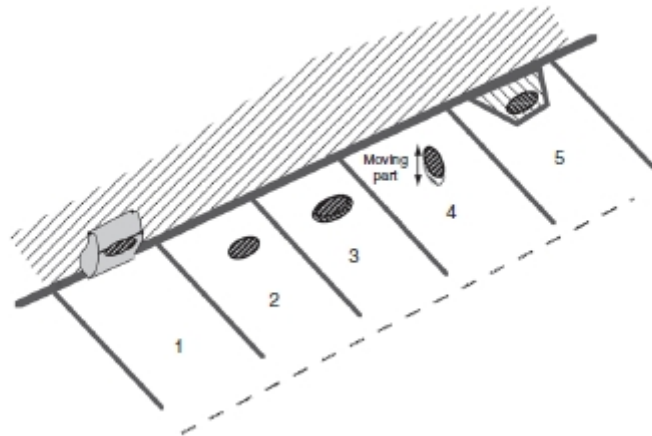
*Fig. 22. Carga de vehículo con cargador inductivo de paletas*

### 3.9.2 Carga inductiva por conexión automática

El sistema de carga inductiva por paletas presentó un avance en la seguridad, pero no prescinde del uso de cables.

En la carga inductiva sin cables solo es necesario estacionar el vehículo adyacente al inductor primario. Esto se puede lograr de varias maneras:

1. Diseño especial de carga posterior
2. Dispositivos fijos, en la superficie del aparcamiento
3. Dispositivos fijos, elevados en el aparcamiento
4. Dispositivos de superficie de la carretera, que incluyen partes móviles
5. Diseños especiales de bordillos



*Fig. 23. Diseños de conexiones automáticas de carga inductiva*

Estos sistemas requieren un diseño específico para satisfacer las necesidades del vehículo y del punto de recarga, su uso se limita principalmente a aplicaciones como líneas urbanas de uso especial y sistemas de alquiler de coches automáticos. Los sistemas de carga inductivos se están implementando en la alimentación de tranvías y autobuses eléctricos sin cables aéreos.

### 3.10 Resumen

Según lo descrito en este capítulo se resume a continuación los procedimientos de cargas utilizados en la actualidad.

La carga normal es la que hace uso de puntos de carga estándar, puede utilizarse potencialmente en cualquier lugar, pero está limitada debido a la potencia limitada de la toma de corriente. Sigue siendo apropiada para cargar los vehículos en casa durante la noche o una carga puntual improvisada. El Modo 1 de carga se puede realizar con la máxima seguridad con una instalación eléctrica que esté ajustada apropiadamente, haciendo uso de los estándares establecidos en la norma IEC 60309-2.

La carga "semirápida" permite una carga a una potencia mayor (hasta 22 kW). Los niveles de potencia requeridos pueden ser entregados por las redes de distribución existentes, siendo el suministro principal de los puntos de recarga dedicados en los dos ámbitos (público

y privado). El uso de alimentación trifásica permite un aumento considerable en la potencia de carga disponible, con accesorios especiales, que se están estandarizando para permitir un funcionamiento flexible del sistema, incluyendo la administración de energía y la interacción “vehicle to grid” , “grid to vehicle” (Smart Grid).

La carga "rápida" necesita una infraestructura más costosa, especialmente cuando se hace mediante corriente continua con cargador externo. La disponibilidad de estaciones de carga rápida proporciona oportunidades para la mejora de la flexibilidad operativa de los vehículos, así como la transferencia de energía bidireccional de alta potencia.

La carga por inducción puede ofrecer oportunidades interesantes mediante la eliminación de los enchufes y cables, pero sus requisitos estructurales la limitan a aplicaciones específicas.

Los vehículos eléctricos de batería eléctrica y los vehículos híbridos enchufables deben ser considerados homólogos en cuanto a sus necesidades “de infraestructura”, en función de la red eléctrica para su abastecimiento de energía; de hecho, ya que es de esperar que la mayoría de los híbridos enchufables serán operados en modo eléctrico.

# **CAPÍTULO 4**

IMPACTO DE LAS ESTACIONES DE CARGA  
DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL  
FUNCIONAMIENTO DE LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN: CASO DE ESTUDIO



## 4 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN CON CARGAS TIPO CARGADORES EV

En este capítulo se pondrá en marcha un modelo de red de distribución de media tensión (MT) al que se le conectarán varias estaciones de carga EV con la finalidad de analizar su influencia sobre las variables eléctricas. Dicho modelo será analizado aplicando el método de *Los Flujos de Carga*. Como punto de partida, se describirá la red eléctrica utilizada y se presentará, de forma concisa, los fundamentos del método. Paso siguiente, se hará una presentación del modelo Matlab-Simulink puesto a punto para el estudio. Finalmente se propondrán varios casos de estudio en los que se analiza la red simulando tres puntos de carga extrapolados de la curva de carga diaria definida por Red Eléctrica de España.

### 4.1 La red de distribución IEEE 15 bus test feeder

En el estudio se ha utilizado una red *tipo* de las definidas por el Instituto Americano de Eléctrica y Electrónica (IEEE). Se trata de una red de distribución de 15 barras [13]. La Fig. 24 corresponde al unifilar de la red. Se trata de una red radial de 11 kV, y acceso a la baja tensión; típica topología de un barrio de ciudad. La red cuenta con una subestación (SS) y con una fuente de generación distribuida (DG). Además hay 15 cargas las cuales representan los puntos de consumo.

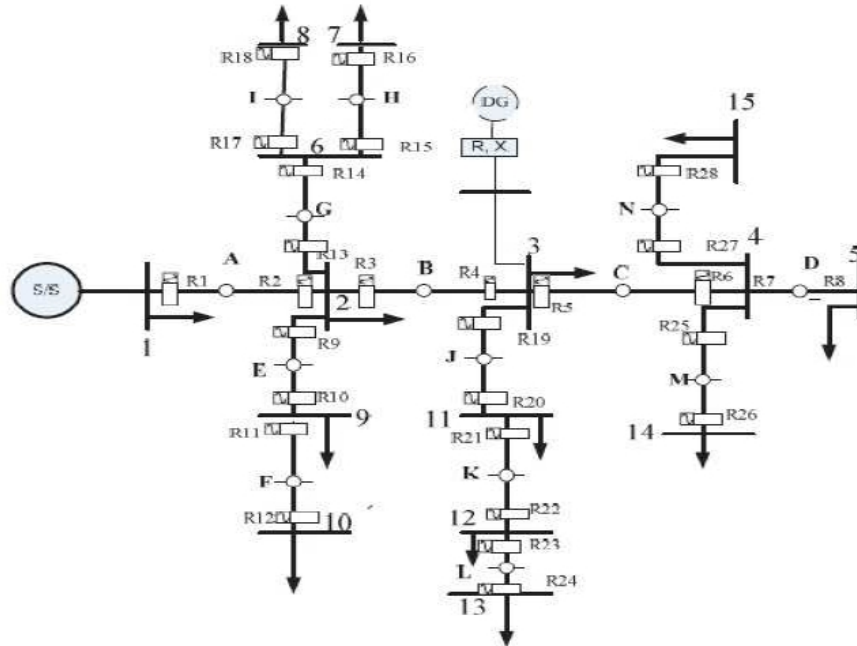


Fig. 24. Red IEE 15 barras.

En las siguientes tablas se recogen los parámetros de los equipos que conforman la red:

De	A	R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	L (H)
1	2	135.309	132.349	0.0035107
2	3	117.024	114.464	0.0030363
3	4	0.84111	0.82271	0.0021823
4	5	153.248	10.276	0.0027258
2	9	201.317	13.579	0.0036019
9	10	168.671	11.377	0.0030178
2	6	255.727	17.249	0.0045754
6	7	10.882	0.734	0.0019470
6	8	125.143	0.8441	0.0022390
3	11	179.553	12.111	0.0032125
11	12	244.845	16.515	0.0043807
12	13	201.317	13.579	0.0036019
4	14	223.081	15.047	0.0039913
4	15	119.702	0.8074	0.0021417

Tabla 2. Parámetros de las barras (IEE 15)

Barra	PL (kW)	QL (kW)
2	44.1	44.99
3	70	71.41
4	140	142.82
5	44.1	44.99
6	140	142.82
7	70	71.41
8	140	142.82
9	70	71.41
10	44.1	44.99
11	70	71.41
12	44.1	44.99
13	140	142.82
14	140	142.82
15	70	71.41
Total	1226.4	1251.11

Tabla 3. Cargas (IEEE 15)

## 4.2 Planteamiento y solución del problema de flujos de cargas

### 4.2.1 Formulación del problema

Por la teoría de circuitos sabemos que la forma de conocer el estado de una red de  $n$  nodos en conociendo el valor de la tensión compleja en cada uno de sus nodos. Las leyes de Kirchhoff y los modelos para cada componente de la red eléctrica se condensan en ecuaciones de nodo, es se escriben, en forma compleja, de la siguiente forma:

$$I = yu \quad (5)$$

O también:

$$I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} u_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Donde  $u$  es el vector de tensiones en el nodo,  $I$  es el vector de intensidades netas que se inyectan en los nodos e  $y$  es la matriz de admitancias de dimensión  $n \times n$ . Además, en cada nodo debe cumplirse:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Ci} = u_i I_i \quad (7)$$

Donde  $S_i$  es la potencia compleja inyectada en el nodo  $i$ , obtenida de la resta entre la potencia generada y la consumida por la carga en dicho nodo. Aplicando dicha ecuación a todos los nodos, puede escribirse de la siguiente forma matricial:

$$S = \text{diag}(u)I \quad (8)$$

Siendo  $S$  el vector de potencias complejas en el nodo y  $\text{diag}(u)$  una matriz diagonal cuyos elementos son los del vector  $u$ .

Conocida la matriz de admitancias, las ecuaciones (5) y (8) constituyen un sistema de ecuaciones de  $2n$  ecuaciones complejas en términos de las  $3n$  incógnitas complejas contenidas en  $S$ ,  $u$  e  $I$ . La complicación reside en que las intensidades nodales complejas no son conocidas ni se especifican a priori. Por este motivo, se sustituye (5) en (8) para eliminar las intensidades. Esto tiene como resultado un sistema de ecuaciones no lineal con  $n$  ecuaciones complejas de la siguiente forma:

$$S = \text{diag}(u)[yu] \quad (9)$$

Descomponiendo la potencia compleja en su parte real e imaginaria ( $S = P + jQ$ ) y empleando las coordenadas cartesianas para la matriz de admitancias ( $y = G + jB$ ). La ecuación (5) se convierte ahora en la siguiente:

$$P + jQ = \text{diag}(u)[G - jB]u \quad (10)$$

$$P_i + jQ_i = u_i \sum_{j=1}^n G_{ij} - jB_{ij} \quad u_i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Debido a la presencia de variables conjugadas y la complejidad de las ecuaciones anteriores, es preciso separar las ecuaciones en ecuaciones reales. Esto puede realizarse de dos formas: expresando la tensión en coordenadas polares o en cartesianas. Lo más habitual es emplear las coordenadas polares ( $u = V \angle \theta$ ), expresándose así las nuevas ecuaciones:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (12)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (13)$$

Se puede observar que éstas ecuaciones nos dejan cuatro incógnitas (P, Q, V y  $\theta$ ) por lo que será necesario especificar dos magnitudes por nudo para que el sistema se pueda resolver. Así, vamos a distinguir dos tipos de nudos:

- **Nudos de consumo o nudos PQ:** en estos nudos se va a conocer el consumo de potencia activa ( $P_{Ci}^{esp}$ ) y reactiva ( $Q_{Ci}^{esp}$ ), siendo nula la generada ( $P_{Gi} = Q_{Gi} = 0$ ). Por tanto, las restricciones serán las siguientes:

$$P_i^{esp} = -P_{Ci}^{esp} \quad Q_i^{esp} = -Q_{Ci}^{esp} \quad (14)$$

Por tanto, las incógnitas serán las dos componentes de la tensión nodal. La mayor parte de los nodos de una red son de este tipo.

- **Nudos de generación o nudos PV:** en este tipo de nudos hay un generador regulando la tensión a un valor especificado ( $V_i^{esp}$ ) e inyectando potencia activa ( $P_{Gi}^{esp}$ ). En este tipo de nudos, las restricciones que determinarán el consumo serán:

$$P_i^{esp} = P_{Gi}^{esp} - P_{Ci}^{esp} \quad V_i = V_i^{esp} \quad (15)$$

Quedando en este caso  $Q_i$  y  $\theta_i$  como incógnitas.

Un caso particular de los nudos PV es cuando se incorpora un compensador de reactiva que sea capaz de regular la tensión. En este caso  $P_{Gi}^{esp} = 0$ . La presencia de pequeños generadores sin reguladores de tensión se puede modelar como nudos de consumo negativo.

Ahora bien, en caso de solo emplearse estos dos tipos de nudos, todas las potencias activas inyectadas deberían indicarse de forma previa, lo cual no es posible ya que las pérdidas que hay en la red y que deben aportar los generadores no se conocen hasta que no se hace el estudio del flujo de potencia por cada elemento. Por tanto, la potencia de al menos un generador no debe ser especificada y se debe calcular al final de proceso. El hecho de trabajar con fasores facilita los cálculos ya que uno de los ángulos de fase se puede tomar libremente como origen de fases. Con objeto de facilitar los cálculos, se suele tomar como

origen de fases el nudo de generación cuya potencia se dejará libre y que tiene capacidad para regular la frecuencia y hace las veces como interconexión con el exterior. Este nudo se denomina nudo de referencia, nudo oscilante o nudo slack.

Por tanto, el número de nudos de generación ( $n_G$ ) sin contar el nudo slack será  $n_G = n - n_D - 1$  donde  $n_D$  será el número de nudos de consumo. Generalmente, se considerará que los  $n_D$  primeros nudos serán de consumo y que el nudo de referencia es el último. Teniendo en cuenta esta nueva clasificación, las ecuaciones (12) y (13) quedan ahora de la siguiente manera:

$$P_i^{esp} = V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n_D + n_G \quad (16)$$

$$Q_i^{esp} = V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n_D \quad (17)$$

La solución de este problema consiste en encontrar los desfases  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_D + n_G$ , y los módulos de tensiones  $V_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_D$ , que satisfacen las  $2n_D + n_G$  ecuaciones (12) y (13).

Se puede comprobar que al fijar la tensión compleja del nudo oscilante y dejar libre su potencia implica que las dos ecuaciones respectivas no intervengan en el proceso. Dichas ecuaciones servirán para, una vez solucionado el problema, hallar la potencia compleja en dicho nudo.

Del mismo modo, las  $n_G$  ecuaciones (13) excluidas de (17) permitirán calcular la reactiva que se necesita inyectar o absorber cada generador para mantener al generador en el valor especificado. Dado que el generador tiene una capacidad limitada para absorber o entregar reactiva, se hace necesaria la comprobación de que no se supera ninguno de los límites, alargando y haciendo más complicado el proceso de solución.

Debido a que las ecuaciones resultantes no son lineales, el problema debe solucionarse de forma iterativa, haciendo necesario la adopción de unos valores iniciales para las variables del problema. La búsqueda de estos valores iniciales es muy complicado, pero debido a las características de este problema y que se conoce de antemano que las tensiones se mueven en un margen pequeño en torno a su valor nominal y, que los desfases se mueven

en márgenes estrechos condicionado por la estabilidad, haciendo que el denominado *perfil plano* sea la mejor opción para iniciar el proceso de iteración. Este perfil consiste en hacer  $\theta_i^0 = 0$  en todos los nudos y  $V_i^0 = 1pu$  para los nudos de consumo. Esto es especialmente útil cuando se analizan distintas perturbaciones a partir del mismo caso aunque, la experiencia ha demostrado que utilizar unos valores más próximos a la solución, aunque arbitrarios, suele dar peores resultados que el perfil plano.

Una vez resueltas las ecuaciones (16) y (17) es posible calcular cualquier magnitud que se desee. Los flujos de potencia para un único elemento conectado entre los nudos  $i$  y  $j$  se pueden obtener de:

$$P_{ij} = V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} - G_{ij} V_i^2 \quad (18)$$

$$Q_{ij} = V_i V_j G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} + V_i^2 B_{ij} - b_{pij} \quad (19)$$

Siendo  $b_p$  la susceptibilidad paralela del modelo  $\Pi$  de la línea. Cuando existen diferentes elementos en paralelo de diferentes características, ha de recurrirse a dicho modelo para calcular los flujos individuales.

De la misma forma, las pérdidas totales del sistema se pueden calcular, una vez conocida la potencia en el nudo slack, sumando las inyecciones de todos los nudos, o bien como suma de las pérdidas de cada elemento.

Antiguamente, la forma de iterar, debido a la poca capacidad de cálculo, era nudo a nudo y sin manipular grandes matrices. Hoy en día su interés industrial es mínimo, pero debido a su simplicidad es habitual su empleo. Un ejemplo de ese tipo de técnicas es el *método Gauss-Seidel*, donde se barre secuencialmente cada nudo y actualiza su tensión en función de los valores disponibles en ese momento de todas las tensiones. Es decir, encontrar el vector  $x$  que satisfaga el sistema no lineal  $f(x) = 0$ , pudiendo formularse el problema como  $F(x) = x$  y cuya solución se encontrará partiendo del valor inicial  $x^0$ .

## 4.2.2 Solución al problema de flujo de carga

La característica no lineal del problema de flujo de cargas implica que sea necesaria la utilización de métodos de cálculo para la solución del problema. Entre los métodos posibles, la práctica totalidad de los casos prácticos son calculados por el método de Newton-Raphson. A continuación se da una breve descripción del método y posteriormente se particularizará para nuestro problema.

## 4.2.3 Técnica numérica de resolución de flujo de carga: método de Newton-Rapson

El método consiste en barrer secuencialmente cada nudo y actualizar su tensión en función de los valores disponibles en ese momento de todas las tensiones. En general, se puede decir que consiste en encontrar el vector  $x$  que en un sistema no lineal se desarrolle en serie alrededor del punto  $x^k$ :

$$f(x) + F(x^k)(x^{k+1} - x^k) = 0 \quad (20)$$

Donde  $F = \frac{\partial f}{\partial x}$  es el jacobiano de  $f(x)$ . Partiendo del valor inicial  $x^0$  se obtendrán correcciones  $\Delta x^k$  resolviendo el sistema lineal:

$$-F(x^k)\Delta x^k = f(x^k) \quad (21)$$

Y nuevos valores de  $x^{k+1}$  de:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (22)$$

El proceso iterativo se detendrá cuando se cumpla que:

$$\max_i |f_i(x^k)| \leq \varepsilon$$

Para un  $\varepsilon$  suficientemente pequeño. Para valores  $x^0$  próximos a la solución, el método de Newton-Raphson converge cuadráticamente (cuando diverge lo hace de la misma forma). En el caso de flujo de cargas, el número de iteraciones oscila entre 3 y 5, independientemente del tamaño de la red, cuando se parte del perfil plano.



El proceso iterativo puede resumirse de la siguiente forma:

1. Se realiza una estimación inicial del vector incógnitas, módulos y argumentos de las tensiones desconocidas
2. Se calcula el vector de residuos de potencias activas y reactivas
3. Si la norma de este vector es menor a la precisión  $\varepsilon$  exigida, se para el proceso iterativo.
4. En caso de que no se cumpla, se calcula la matriz jacobiana  $[F]$  y se obtiene el nuevo vector de incógnitas.
5. Se continúa el proceso iterativo en el paso 2 hasta que se cumpla la condición del paso 3.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo con objeto de facilitar el entendimiento del método. La función con la que se harán los cálculos es la siguiente:

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4$$

Igualando la función a cero, se obtiene que el valor exacto de la raíz es  $x = 4$ . Como estimación inicial se tomará un  $x^0 = 6$ .

El término jacobiano de esta función es de la siguiente forma:

$$F = \frac{\partial f}{\partial x} = 3x^2 - 12x + 9$$

Partiendo de la estimación inicial  $x^0 = 6$  y empleando la ecuación (17) tenemos que:

$$-F(x^0)\Delta x^0 = f(x^0)$$

Por tanto:

$$\Delta x^0 = \frac{-f(x^0)}{F(x^0)}$$

Sustituyendo en las funciones tenemos:

$$f(x^0) = 6^3 - 6 \cdot 6^2 + 9 \cdot 6 - 4 = 50$$

$$F(x^0) = 3 \cdot 6^2 - 12 \cdot 6 + 9 = 45$$

De manera que:

$$\Delta x^0 = \frac{-50}{45} = -1,1111$$

Por tanto, el resultado de la primera interacción será:

$$x^1 = x^0 + \Delta x^0 = 6 + (-1,1111) = 4,8889$$

Repitiendo el proceso para  $k = 2$ :

$$\frac{4,8889 \cdot (-1|3 - 6 \cdot 4,8889^2 + 9 \cdot 4,8889 - 4)}{3 \cdot 4,8889^2 - 12 \cdot 4,8889 + 9}$$
$$x^2 = x^1 + \Delta x^1 = 4,8889 +$$

$$x^2 = 4,8889 - \frac{13,4433}{22,0372} = 4,2789$$

La siguiente gráfica muestra la representación de la función original y las rectas correspondientes a estas dos primeras iteraciones:

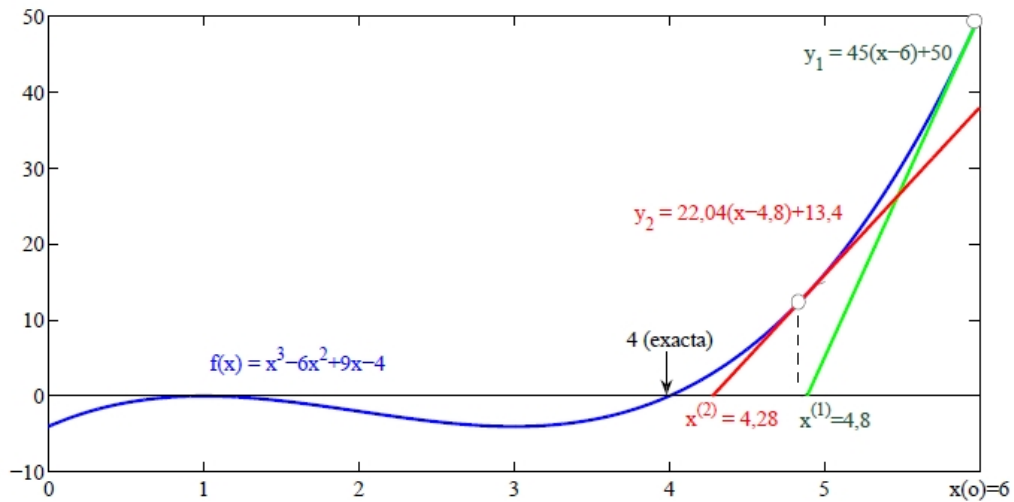


Fig. 25. Gráfica de la función y de las rectas correspondientes a las dos iteraciones

En la siguiente tabla se recogen los valores para las 5 primeras iteraciones:

Iteración	$f(x^k)$	$F(x^k)$	$\Delta_x$	$x^k$
1	-50,0000	45,0000	-1,1111	4,8889
2	-13,4433	22,072	-0,6100	4,2789
3	-2,9981	12,5797	-0,2383	4,0405
4	-0,3748	9,4914	-0,0395	<b>4,0011</b>
5	-0,0095	9,0126	-0,0011	<b>4,0000</b>

Entre las iteraciones número 4 y 5 se produce un error  $x^4 - x^5 = 0,0011$  que cumple con un criterio de convergencia de aproximadamente  $\epsilon = 10^{-3}$ .

#### 4.2.4 Aplicación del método al problema de los flujos de carga

Aplicando el método para los flujos de carga,  $x$  corresponderá a los valores de las tensiones de barra (módulo y ángulo), de forma que:

$$f \begin{matrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{matrix}^T = \begin{matrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{matrix}^T$$

Siendo:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (23)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n_D \quad (24)$$

De esta manera, dividiendo el jacobiano en submatrices y aplicando la ecuación (21) al problema de flujos de carga, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{matrix} H & N^k \\ M & L \end{matrix} \begin{matrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{matrix}^k = \begin{matrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{matrix}^k \quad (25)$$

$$\begin{matrix} \theta \\ V \end{matrix}^{k+1} = \begin{matrix} \theta \\ V \end{matrix}^k + \begin{matrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{matrix}^k \quad (26)$$

Emplear en la ecuación (21)  $\Delta V/V$  en lugar de  $\Delta V$  no afecta numéricamente pero simplifica los términos del jacobiano haciéndolo más simétrico (numéricamente). Los términos del jacobiano se obtienen de las siguientes definiciones:

$$\frac{-\partial f_i^{esp} - f_i}{\partial x_j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

Donde  $f$  podrá ser indistintamente  $P$  o  $Q$  y  $x$  se refiere a  $V$  o  $\theta$ . Desarrolladas las definiciones, los valores que toman los componentes del jacobiano dependerán de los valores  $i$  y  $j$ :

1. Cuando  $i$  y  $j$  son diferentes: los componentes del jacobiano son los siguientes:

$$H_{ij} = L_{ij} = V_i V_j G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}$$

$$N_{ij} = -M_{ij} = V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}$$

2. Cuando i y j son iguales:

$$H_{ii} = -Q_i - B_{ii} V_i^2$$

$$L_{ii} = Q_i - B_{ii} V_i^2$$

$$N_{ii} = P_i + G_{ii} V_i^2$$

$$M_{ii} = P_i - G_{ii} V_i^2$$

Es notable que en las expresiones del jacobiano y de  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  hay muchos términos iguales, lo que servirá para ahorrar esfuerzo en el cálculo.

La solución del flujo de cargas por este método tendrá los siguientes pasos:

1. Inicializar tensiones con el perfil plano o con la solución de un caso anterior
2. Calcular  $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$  y los términos del jacobiano. Si todos los componentes del vector son menores que  $\varepsilon$ , detener el proceso. Si no, continuar.
3. Obtener  $\frac{\Delta \theta}{\Delta V/V}$  resolviendo el sistema de la ecuación (25)
4. Actualizar  $\frac{\theta}{V}$  y volver al paso 2.

Es necesario recordar que por cada nudo PV se ahorra una ecuación en el sistema anterior, constituyendo esto una ventaja importante de la formulación polar.

### 4.3 Datos de consumo de las estaciones de carga

En primera instancia se prevé analizar los flujos de carga de la red sin alterar, y a continuación introducir los puntos de carga de los vehículos eléctricos (en forma de cargas

inductivas estáticas) y ver cómo afectan a la red. Se colocarán en los puntos más críticos de la red IEE 15, en los puntos más alejados de las fuentes para estudiar los casos más desfavorables.

Para poder caracterizar las estaciones de carga se tendrá en cuenta los consumos del vehículo eléctrico, teniendo en cuenta tres niveles los consumos del vehículo eléctrico se exponen en la siguiente tabla:

	Tiempo	Corriente (A)	Voltaje (V)	P (kW)	
Nivel I	6- 8 horas	16	120 (AC)	1,92	Monofásico
Nivel II	4 - 6 horas	16	240 (AC)	3,84	Monofásico
	3 - 4 horas	32	240 (AC)	7,68	Monofásico
	2 - 3 horas	16	400 (AC)	11	Trifásico
	1 -2 horas	32	400 (AC)	22	Trifásico
	20-30 Min.	63	400 (AC)	43,6	Trifásico
Nivel III	15-30 Min.	100	450 (CC)	45	-

*Tabla 4. Datos de consumos del vehículo eléctrico*

Se tomaran factores de simultaneidad de 1 para las cargas múltiples si no hay control electrónico de potencia para la seguridad del usuario contra sobrecargas y 0,3 si existen equipos de control, esto irá por lo tanto en función del modo de carga (ya citado en el apartado 3.5).

Disponiendo por lo tanto de los parámetros de la red, así como del consumo de los vehículos eléctricos se va a estudiar los flujos de carga y como afecta la inclusión de los puntos de carga en la red propuesta.

#### 4.4 Casos de estudio

Se parte de una red no saturada, lo cual en cierta forma no refleja la realidad de las redes de distribución de muchas ciudades españolas donde el índice de carga suele superar con frecuencia el 90%. Por este motivo los casos de estudio se plantean desde un punto de vista de análisis de tendencia.

Se contemplan dos escenarios:

- Escenario base, se simula la red sin la inclusión de estaciones de carga, con la finalidad de tener un punto de referencia para los valores de carga tensión y corrientes de la red
- Escenario DOS, se simula la red implementando las estaciones de carga para estudiar el impacto de las mismas en las tensiones y las corrientes de la red.

Se simulara para ambos escenarios, tres situaciones de demanda diferentes que corresponden a puntos de la curva de carga diaria:

1. Horas de demanda máxima (Horas pico),
2. Horas de demanda intermedia,
3. Horas de demanda mínima (Horas valle).

#### 4.4.1 Escenario UNO: red de distribución sin estaciones de carga

La red implementada en Simulink y cuyos parámetros han sido definidos anteriormente es la mostrada a continuación:

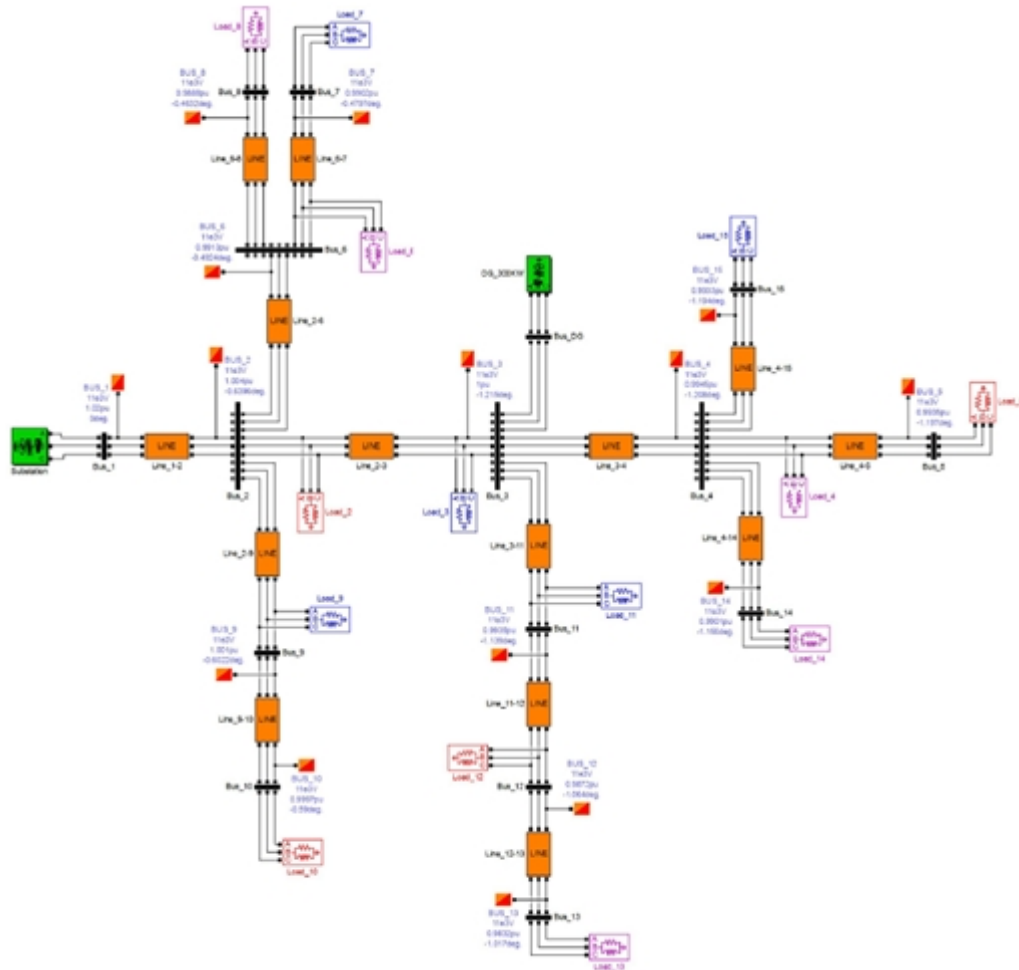


Fig. 26. Red implementada en Simulink, sin puntos de carga de vehículo eléctrico.

Una vez implementada la red en Simulink se estudiarán los flujos de carga inicialmente sin la implementación de los puntos de carga dedicados. Para este primer caso se van a calcular los flujos de carga en tres escenarios:

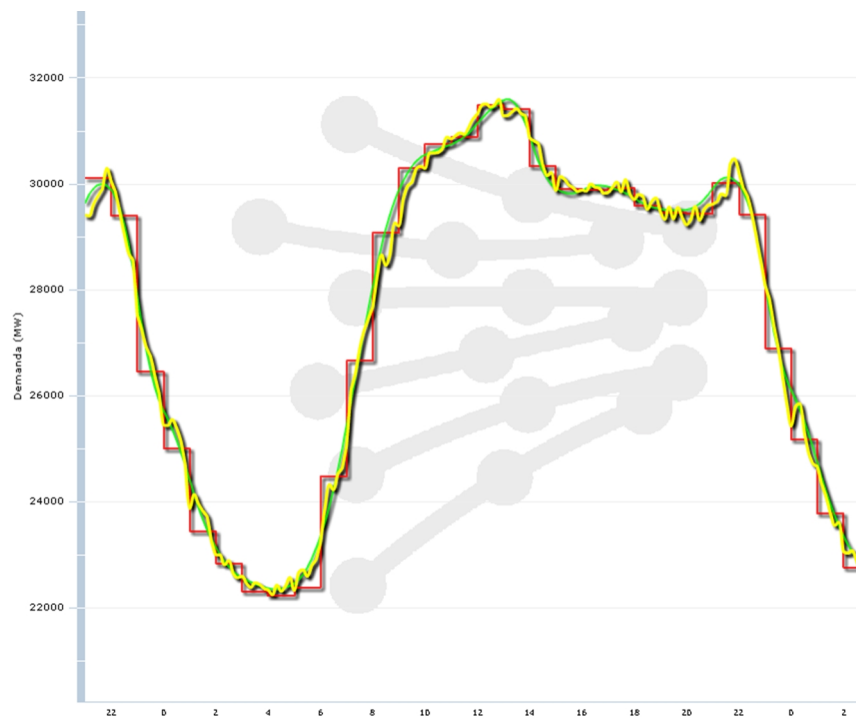
- Horas pico
- Horas valle
- Horas de demanda intermedia

Para el estudio de las tres hipótesis se tomarán las cargas como estáticas y se variará su consumo en función de la demanda máxima. Partiendo de los valores de las cargas establecidos en la Tabla 5, siendo estos los valores intermedios de las cargas y llegando a aumentar un 100%. Para establecer esta hipótesis el estudio se ha basado en la curva de



demanda diaria la cual tiene horas de demanda mínima (valle) y horas de demanda máximo (pico). Existen periodos anuales o incluso días específicos en los cuales las diferencias de demanda entre horas pico-valle son de más del doble, por lo tanto se adoptará un caso desfavorable para su posterior estudio de flujos de carga.

En la siguiente gráfica se observa la curva de demanda diaria del miércoles 5 de Mayo de 2016 donde existe una diferencia apreciable de la demanda del sistema peninsular, y se pueden observar las citadas horas valle, generalmente entre la 1:00 AM y las 6:00 AM , y las horas pico 6:00 – 14:00 y 20:00 – 0:00 .



**Demanda (MW) a las 03:00 de 02/06/2016**    ■ **Real = 22731**    ■ **Prevista = 22735**    ■ **Emisiones CO2 (t/h) = 3763**

*Fig. 27. Curva de demanda diaria (fuente: REE [14])*

Una vez conocidos los flujos de carga en los diferentes escenarios se implementarán los puntos de carga y se verá como varían los flujos de carga en la red.

#### 4.4.2 Escenario DOS

A continuación se estudiarán los flujos de carga en la red con la implementación de tres “gasolineras eléctricas” en tres puntos de la red de distribución. En la siguiente imagen se muestra la red así como la situación de los puntos de carga dedicados implementados en el modelo en Simulink. Se recuadran en rojo las tres estaciones de carga implementadas:

Una vez implementada la red en Simulink se estudiarán los flujos de carga con la implementación de los puntos de carga dedicados. Para este segundo caso se van a calcular los flujos de carga en tres escenarios, como se hizo en el caso anterior.

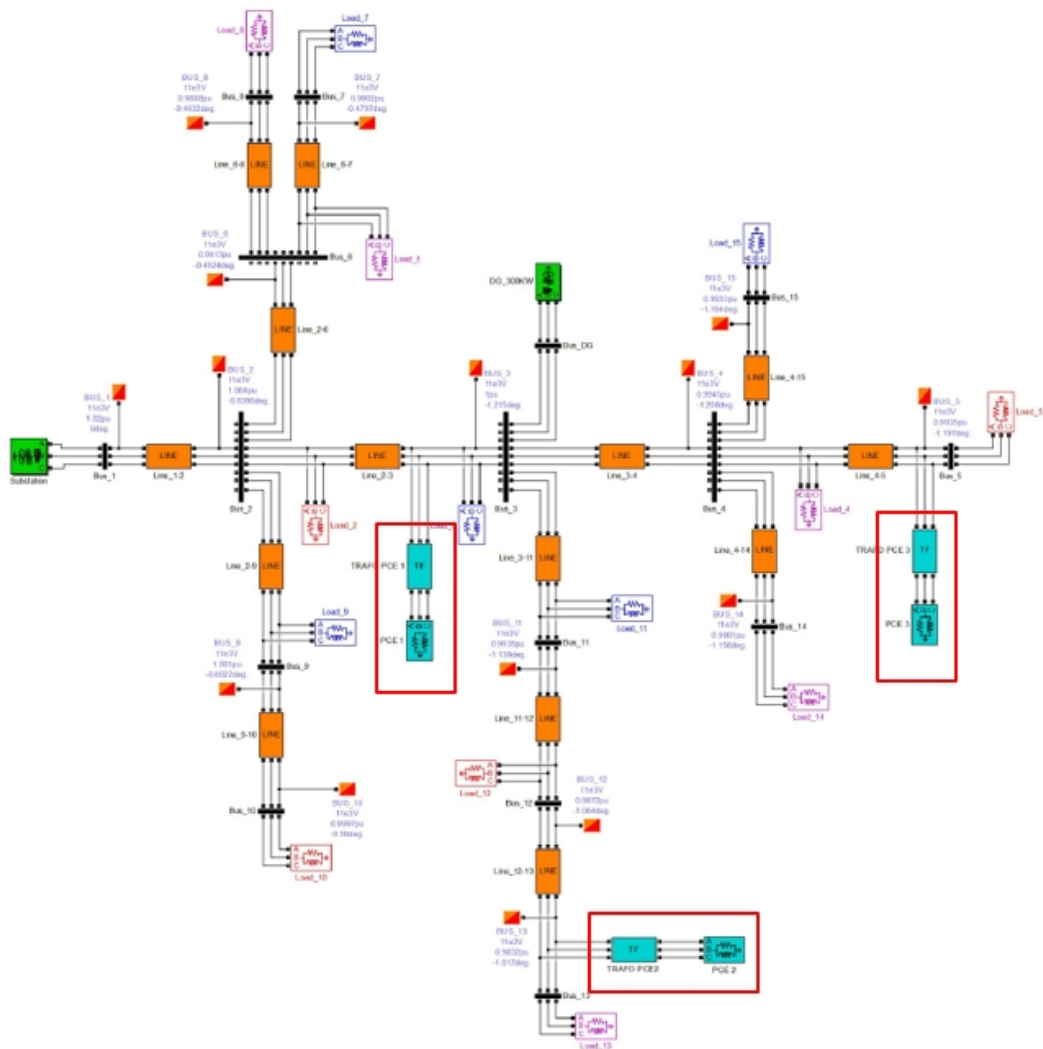


Fig. 28. Red implementada en Simulink, con puntos de carga para vehículos eléctricos. Las estaciones de carga están remarcadas con recuadros rojos.

Para el estudio de las tres hipótesis se tomarán las cargas como estáticas y se variará su consumo en función de la demanda máxima. Partiendo de los valores de las cargas establecidos en la Tabla 6, siendo estos los valores intermedios de las cargas y llegando a doblarse en las horas pico.

Para la implementación de los puntos de carga se han tomado los datos de consumo de la Tabla 4.

La demanda de energía por parte de las estaciones de carga es estocástica. En este estudio se propone asignar una potencia constante para las estaciones de carga. De este modo se sustituye la demanda estocástica con una potencia determinista, situándonos en el caso desfavorable. Ya que el problema de aprovisionamiento de energía debe ser considerado cautelosamente. Estas hipótesis son cruciales en desarrollo preliminar de la implementación de estaciones de carga.

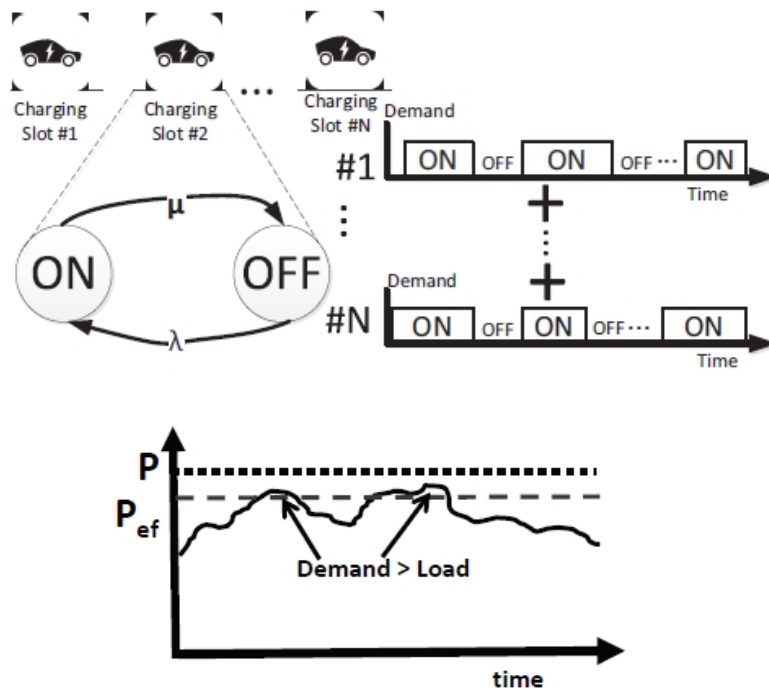


Fig. 29. Hipótesis consumo de las estaciones de carga.

Se ha supuesto un consumo cercano al máximo (ver tabla 4), ya que aunque no todos los coches estarán cargando en el mismo modo ni en el mismo instante, en ciertos instantes críticos la estación de carga ha de tener la suficiente potencia para suministrar energía a un número de coches. Se ha estimado oportuno adoptar un consumo de 22kW para cada vehículo, siendo la capacidad de cada estación de carga de 18 vehículos en el Nivel II de carga.

#### 4.5 Comparación de los estudios de flujos de carga en los diferentes escenarios

Una vez calculados los flujos de carga en ambos escenarios y para varias situaciones en cada caso (horas pico, valle u horas de carga intermedia) se procede a comparar los resultados, en pos de conocer el impacto de los puntos de carga dedicados para vehículos eléctricos en una red de distribución tipo estudiada (IEE 15).

#### 4.6 Estudio de tensiones

Se han calculado las tensiones en las barras en los tres escenarios (horas pico, horas valle y horas de demanda intermedia) en la red de distribución propuesta, con estaciones de carga y sin estaciones de carga.

A continuación se analizará el impacto que tiene sobre las tensiones en barras la implementación de dichas gasolineras eléctricas en la red de distribución:

##### 4.6.1 Horas valle

En las horas en las que la demanda es menor y por lo tanto la red de distribución está menos sobrecargada las caídas de tensión serán menores que en zonas horarias con mayor sobrecarga de la red, sin embargo sí que son significativas dichas caídas de tensión sobre todo en algunas barras en particular. A continuación se muestran las tensiones en barras de la red de distribución a estudio (en pu):

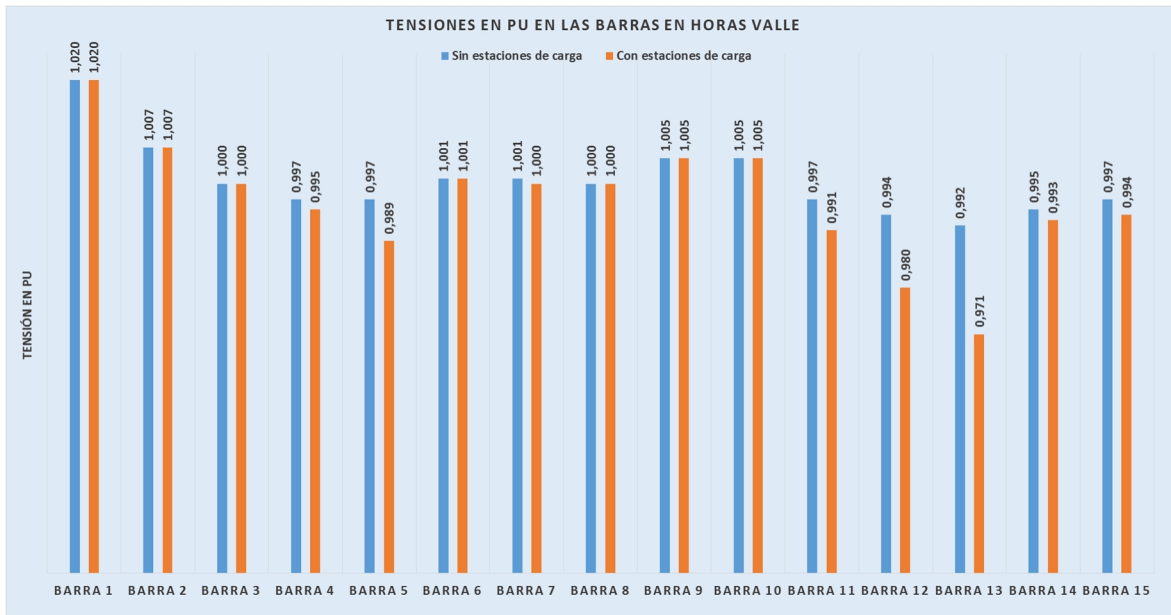


Fig. 30. Tensiones en pu en barras en horas valle

En algunas de las barras apenas existe una variación de la tensión, sin embargo en las barras 5, 12 y 13 es especialmente perceptible. Se va a cuantificar más en detalle la caída de tensión de estas barras ya que se verán más afectadas por la inclusión de los puntos de carga de vehículos eléctricos, debido a su proximidad a las mismas.

Se muestra de nuevo en la siguiente imagen parte de la red de distribución, con el objeto de identificar las barras 5, 12 y 13 (marcadas en rojo).

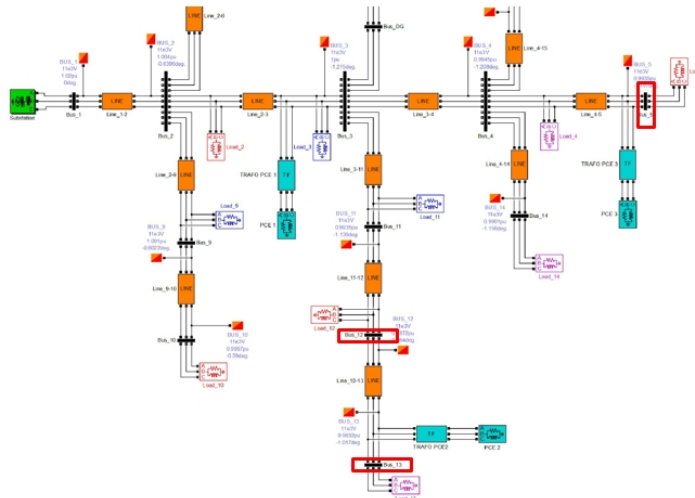
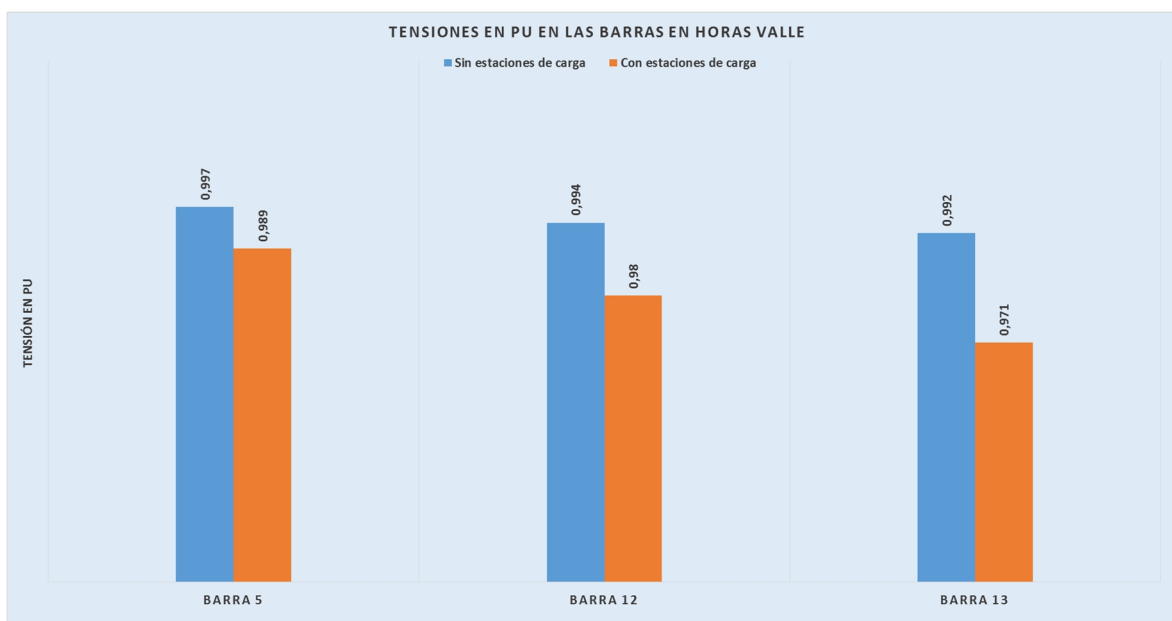


Fig. 31. Localización de las barras 5, 12 y 13 en la red de distribución

Si se analiza la red, se podría pensar que también se verían notablemente afectadas las barras 2 y 3 al estar cercanas a la otra estación de carga, y no es así, esto se debe a que están más cercanas a la subestación y al punto de generación distribuida, reduciendo el impacto que supone la implementación de las estaciones.

En la siguiente gráfica se muestra más detalladamente las variaciones de tensiones para ambos casos.



*Fig. 32. Tensiones en pu en barras sensibles, horas valle*

La caída de tensión entre la barra 12 y 13 en horas valle en la red de distribución estudiada pasa de ser de 0,002 a 0,009 (pu), es decir más de un 300% de aumento de la caída de tensión, unos aumentos considerables de las caídas de tensión en las barras pueden ocasionar fallos en el funcionamiento de los equipos conectados en las mismas.

Análogamente la tensión que llega a los puntos más alejados de las fuentes y con puntos de carga como es el caso de la barra 5 la tensión en barras caerá notablemente, cayendo en torno al 1%. Nótese que la tensión en la barra 13 es un 2% menor, en el caso de que la red dispusiera de estaciones de carga.

#### 4.6.2 Horas de demanda intermedia

En las horas en las que la demanda es algo mayor pero aún no la máxima la red de distribución estará más sobrecargada y por lo tanto las caídas de tensión serán mayores que en zonas horarios con menor demanda, sin embargo menores que en horas pico.

A continuación se muestran las tensiones en barras de la red de distribución a estudio en horas de demanda intermedia (en pu):

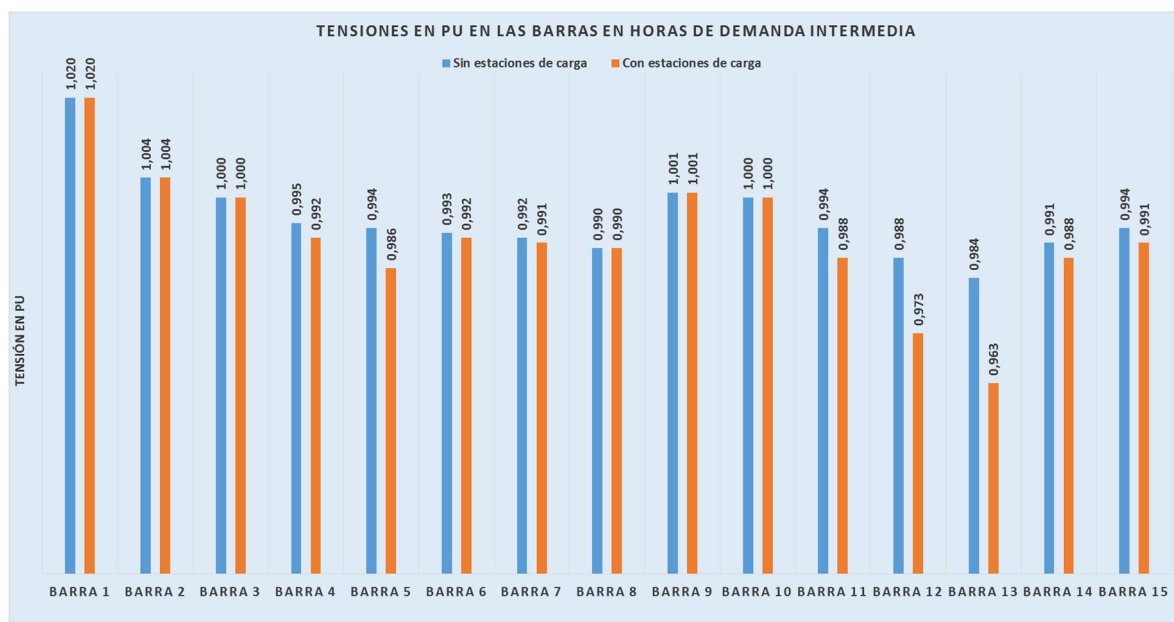


Fig. 33. Tensiones en pu en barras en horas de demanda intermedia

En la siguiente gráfica se muestra más detalladamente las variaciones de tensiones en las barras más “sensibles” antes citadas para el caso de un escenario de demanda intermedia:

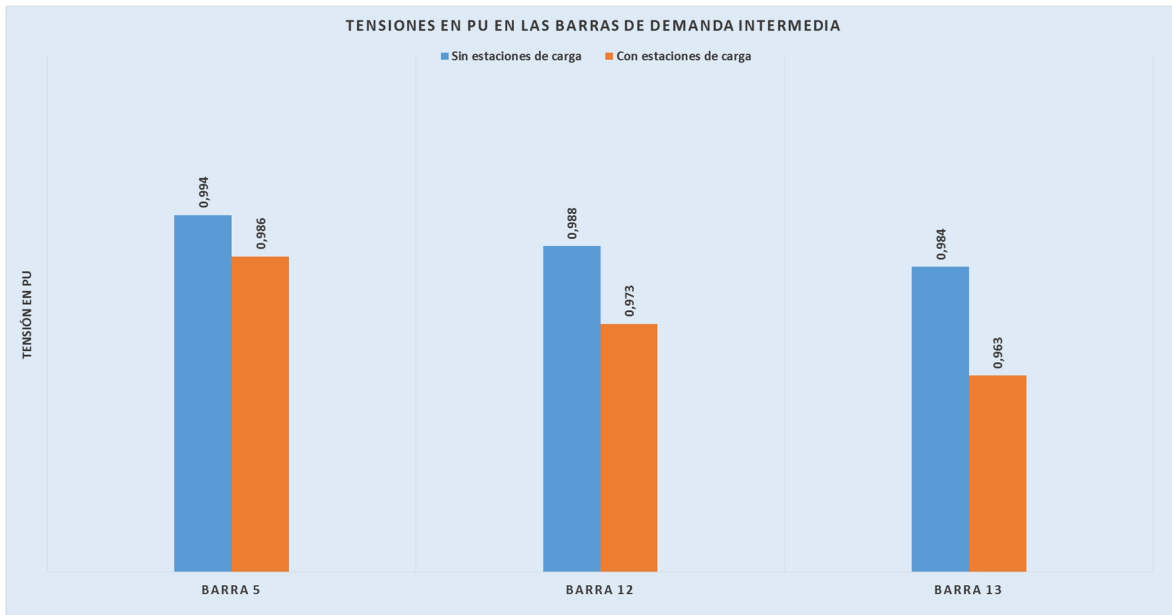


Fig. 34. Tensiones en pu en barras sensibles, horas de demanda intermedia

La caída de tensión entre la barra 12 y 13 en horas de demanda intermedia en la red de distribución estudiada pasa de ser de 0,004 a 0,010 (pu), es decir más de un 200% de aumento de la caída de tensión.

Análogamente la tensión que llega a los puntos más alejados de las fuentes y con puntos de carga como es el caso de la barra 5 la tensión en barras caerá notablemente, cayendo en torno al 1%. Nótese que la tensión en la barra 13 es un 2,2% menor, en el caso de que la red dispusiera de estaciones de carga.

#### 4.6.3 Horas pico

En las horas en las que la demanda es máxima y por lo tanto la red de distribución está más sobrecargada las caídas de tensión serán mayores que en zonas horarios con menor demanda. Luego estamos en el “peor” de los escenarios. A continuación se muestran las tensiones en barras de la red de distribución a estudio, para el caso de situaciones de máxima demanda (en pu):



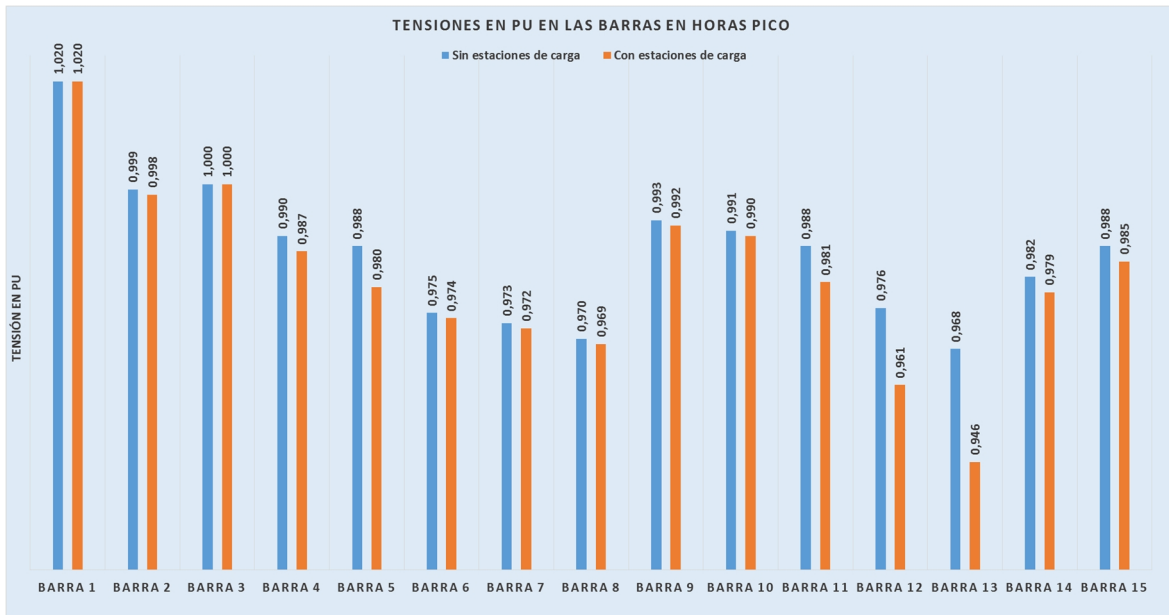


Fig. 35. Tensiones en pu en barras en horas pico

Como en los anteriores casos, se muestra más detalladamente en la siguiente gráfica las variaciones de tensiones en las barras más “sensibles” para el caso de un escenario de demanda máxima (horas pico):

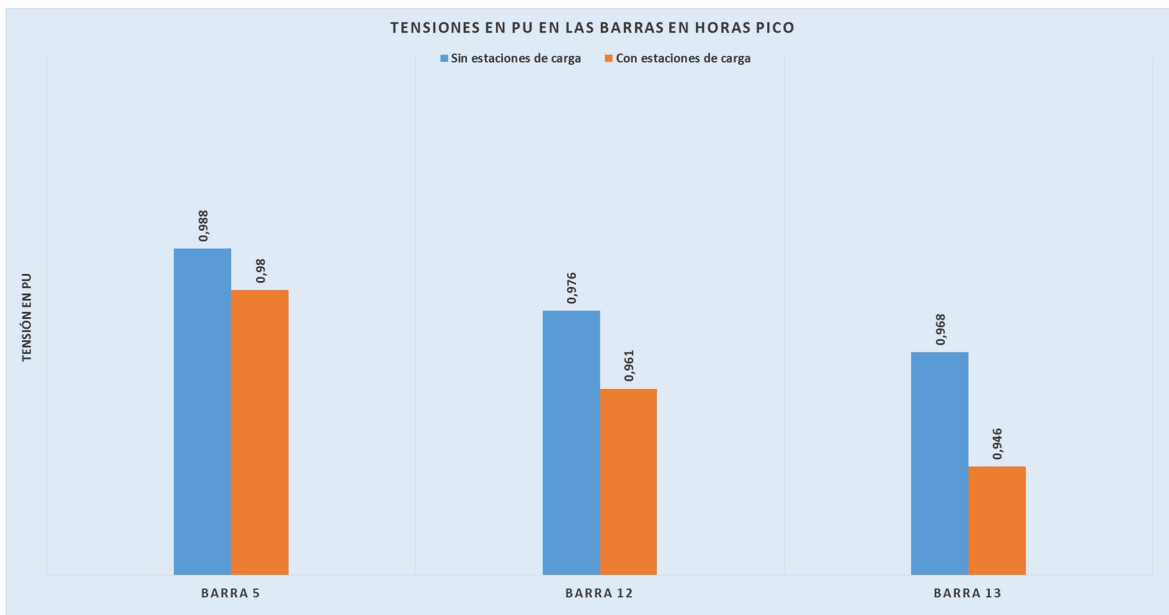


Fig. 36. Tensiones en pu en barras sensibles, horas pico

La caída de tensión entre la barra 12 y 13 en horas de demanda máxima pasa de ser de 0,008 a 0,015 (pu), es decir casi un 100% de aumento de la caída de tensión.

Análogamente la tensión que llega a los puntos más alejados de las fuentes y con puntos de carga como es el caso de la barra 5 la tensión en barras caerá notablemente, cayendo en torno al 1%. Nótese que la tensión en la barra 13 es un 2,3% menor, en el caso de que la red dispusiera de estaciones de carga.

### Conclusiones del análisis de tensiones

Como se ha visto gráficamente la inclusión de las estaciones de carga en la red de distribución aumenta las caídas de tensión en la misma, provocando unas mayores pérdidas y pudiendo ocasionar fallos de funcionamiento de algunos equipos alejados de la subestación y del punto de generación distribuida.

Las caídas de tensión son especialmente notables en el caso de demanda máxima (horas pico) llegando a caídas de tensión que rondan los 250V, en algunas barras críticas.

### 4.7 Corrientes

Posteriormente al análisis de tensiones se procede al estudio de las corrientes de la red de distribución propuesta. Tenemos las siguientes corrientes de línea:

- Corriente de línea 2 - 3
- Corriente de línea 12 -13
- Corriente de línea 4 -5
- Corriente de línea 11 -12
- Corriente de línea 2 -6
- Corriente de línea 2 -9
- Corriente de línea 3 -11
- Corriente de línea 3 -4
- Corriente de línea 4 -14
- Corriente de línea 4 -15
- Corriente de línea 6 -7
- Corriente de línea 6 -8
- Corriente de línea 9 -10

A continuación se muestra en forma de tabla los valores de las corrientes en función de la demanda y si han sido o no implementadas las estaciones de carga en la red.

	<b>25% SIN ESTACIONES DE CARGA</b>	<b>25% CON ESTACIONES DE CARGA</b>	<b>50% SIN ESTACIONES DE CARGA</b>	<b>50% CON ESTACIONES DE CARGA</b>	<b>100% SIN ESTACIONES DE CARGA</b>	<b>100% CON ESTACIONES DE CARGA</b>
	<b>I (A)</b>	<b>I (A)</b>	<b>I (A)</b>	<b>I (A)</b>	<b>I (A)</b>	<b>I (A)</b>
<b>Corriente de línea 2 - 3</b>	38,05	77,06	40,36	74,16	67,23	71,66
<b>Corriente de línea 12 - 13</b>	6,29	25,38	10,48	25,22	13,38	25,24
<b>Corriente de línea 4 -5</b>	2,05	22,85	3,26	20,43	4,15	17,33
<b>Corriente de línea 11 - 12</b>	8,36	26,81	13,77	27,77	17,58	29,36
<b>Corriente de línea 2 -6</b>	15,55	14,01	26,01	23,53	34,24	35,67
<b>Corriente de línea 2 -9</b>	5,09	4,58	8,4	7,6	10,95	11,65
<b>Corriente de línea 3 -11</b>	11,45	29,13	18,95	31,96	24,16	36,09
<b>Corriente de línea 3 -4</b>	17,55	34,37	29,2	41,1	37,01	50,42
<b>Corriente de línea 4 -14</b>	6,22	5,57	10,4	9,32	13,2	14,07
<b>Corriente de línea 4 -15</b>	3,1	2,75	5,18	4,64	6,58	7,06
<b>Corriente de línea 6 -7</b>	3,11	2,8	5,21	4,71	6,85	7,15
<b>Corriente de línea 6 -8</b>	6,23	5,6	10,4	9,41	13,73	14,26
<b>Corriente de línea 9 -10</b>	2,03	1,83	3,25	2,94	4,24	4,51

*Tabla 7. Tabla resultados análisis de corrientes*

Se puede ver a simple vista como todas las corrientes aumentan significativamente en todas las ramas de la red de distribución. Con la intención de expresar los resultados de forma más visual se va a mostrar una gráfica para representar la tendencia de las corrientes en los diferentes escenarios de demanda.

#### 4.7.1 Horas valle

Se muestra a continuación las corrientes en A para las horas de demanda mínima en la red de distribución a estudio:

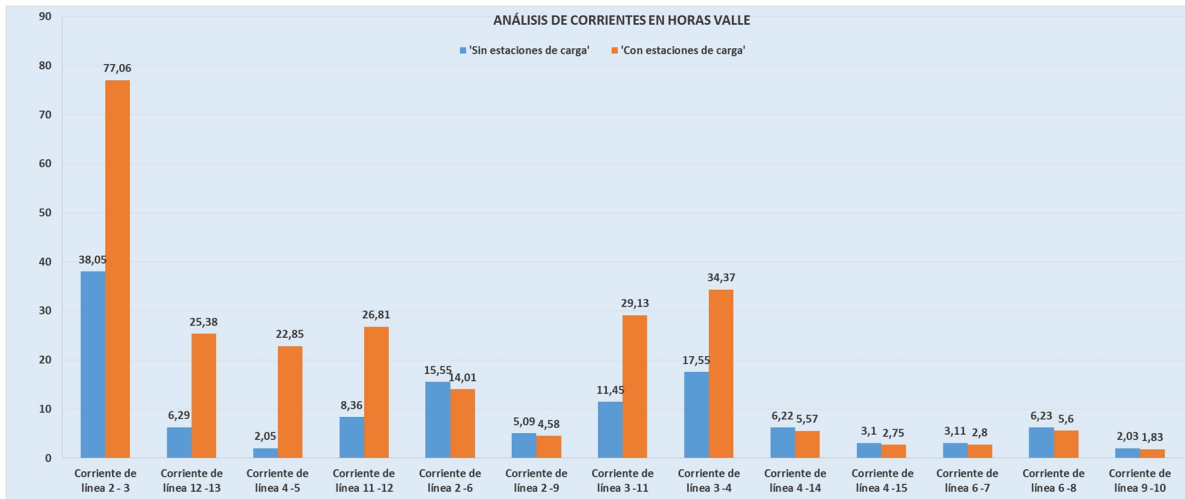


Fig. 37. Análisis de corrientes de línea en horas valle

Como en los casos de las tensiones habrá líneas que sufran más el efecto de la implementación de las estaciones de carga, como es el caso de las líneas 2-3, 12-13, 11-12, 3-11 y 3-4.

#### 4.7.2 Horas de demanda intermedia

Se muestra en esta ocasión el análisis de corrientes en A para horas de demanda intermedia en la red objeto:

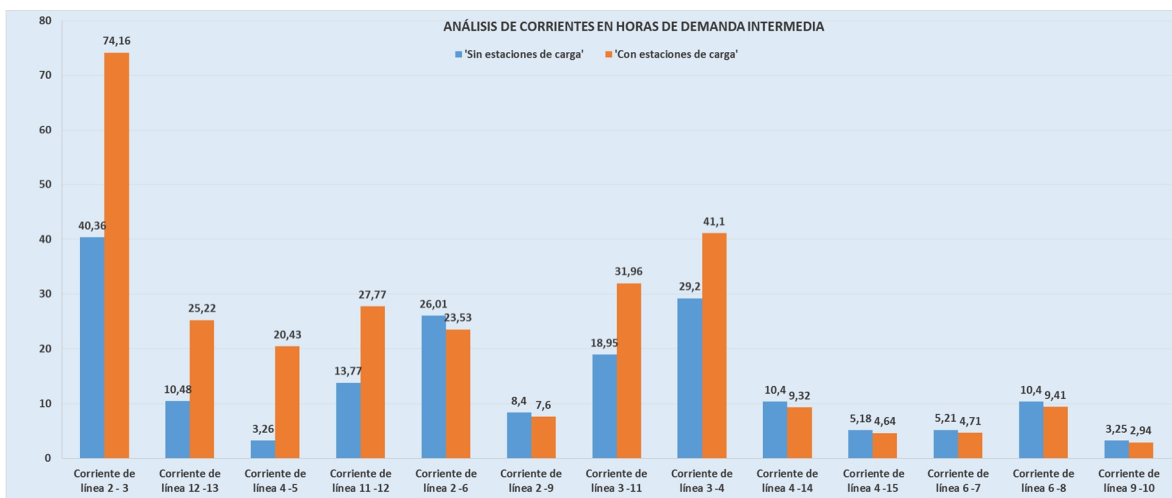


Fig. 38. Análisis de corrientes de línea en horas de demanda intermedia

Como ocurre en el anterior caso las corrientes aumentan notablemente, siendo especialmente notables los cambios en las líneas 2-3, 12-13, 11-12, 3-11 y 3-4.

### 4.7.3 Horas pico

Finalmente se muestra el análisis de corrientes en A para horas de demanda máxima (Fig. 39).

Como en los casos anteriores las corrientes aumentan notablemente. En este caso sería particularmente interesante estudiar la sobrecarga de la red con objeto de estimar posibles sobrecargas en puntos críticos ya que se acentúa aún más las corrientes máximas circulantes por la red de distribución.

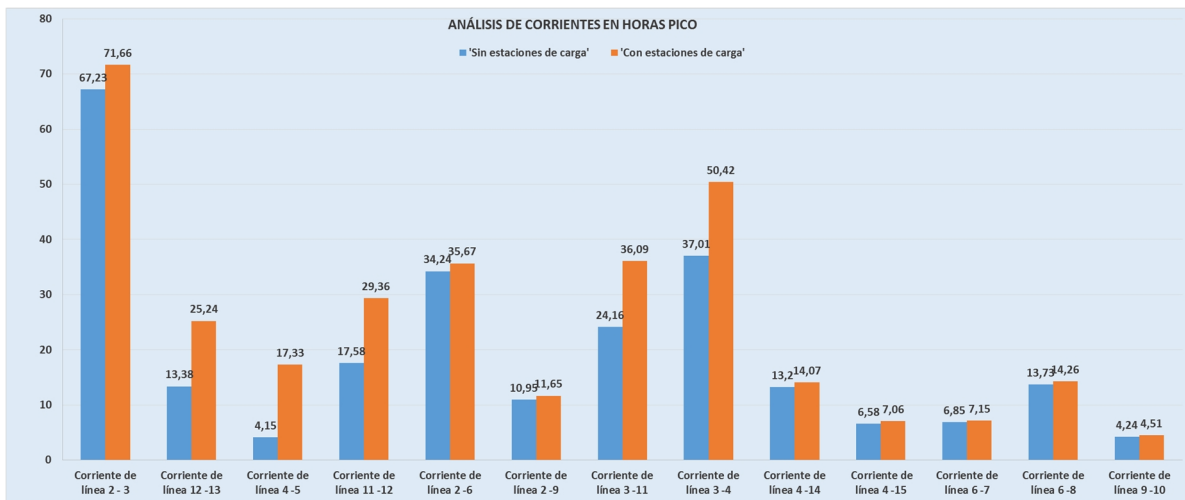


Fig. 39. Análisis de corrientes de línea en horas pico

## Conclusiones del análisis de corrientes

En algunas casos la corriente se duplica y triplica, incluso llegando a incrementos de diez veces su valor, esto es un grave problema ya que en horas donde la demanda sea máxima tendremos problemas de sobrecarga de la red.

### 4.8 Pérdidas

Una vez realizados los análisis de tensiones y corrientes se comparan brevemente las pérdidas eléctricas de la red analizada para los tres escenarios de demanda y en caso de incorporar o no las estaciones de carga.

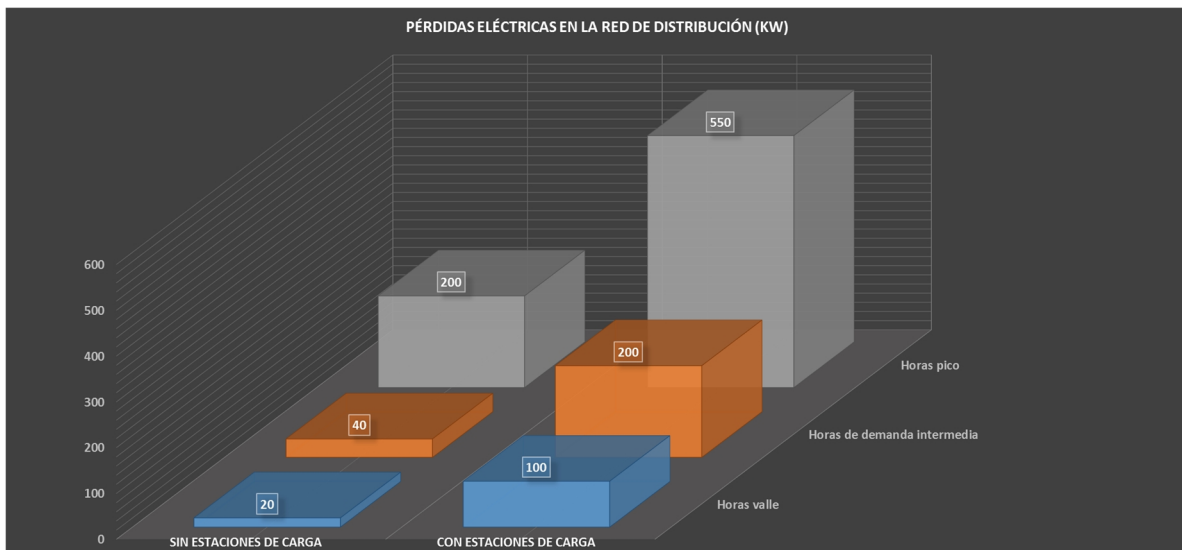


Fig. 40. Pérdidas eléctricas de la red de distribución.

A simple vista observamos como las pérdidas en la red aumentan hasta en **cinco veces** para el caso de la red en horas de baja demanda y se duplica en el caso de hora de demanda máxima llegando a alcanzar los 550 kW de pérdidas en horas pico con las estaciones de carga.

## 5 CONCLUSIONES

En el marco de este trabajo de fin de máster se ha pretendido un acercamiento a las tecnologías de los vehículos eléctricos desde el punto de vista de la red de distribución que es, en última instancia, quien debe suministrar los consumos que demanden este tipo de cargas. La inclusión masiva de estaciones de baterías en una parte de la red ya de por sí saturada entraña retos tecnológicos tanto de desarrollo de la propia red como de gestión de la energía.

Se ha efectuado una revisión bibliográfica, fundamentalmente de artículos de revistas de investigación, a partir de la cual se obtuvo una visión general de las tecnologías en desarrollo y del avance de la técnica. Además, se modeló una red de distribución utilizando el programa Matlab-Simulink incluyendo estaciones de carga de baterías. Con este modelo se efectuó un estudio de tendencia de las variables eléctricas principales haciendo una aproximación a la curva de demanda diaria.

A partir de los resultados obtenidos se plantean las siguientes observaciones finales:

- Existe un problema de aprovisionamiento de la energía eléctrica en las estaciones de carga de vehículos eléctricos a gran escala.
- El problema de la gestión de las estaciones de carga de vehículos eléctricos es la demanda estocástica de energía, así como los diferentes requisitos de nivel de carga.
- La sobrecarga de la red puede ser considerable sobre todo en redes previamente sobrecargadas y en horas de demanda máxima. En los que las caídas de tensión pueden ser muy significativas.
- Se prevé como una posible solución, la interacción “vehicle to grid & grid to vehicle” para amortiguar el efecto del coche eléctrico en la red, vertiendo energía a la red en horas pico y absorbiendo energía en horas valle. Convirtiendo al parque de vehículos eléctricos en una especie de “batería móvil gigante”, que sirva de reservorio de energía estableciendo una tendencia de aplanamiento de la curva de demanda de electricidad.

- Otro modo de amortiguar el impacto de los puntos de carga es la implementación de baterías en las redes de distribución con el fin de tener un reservorio de energía que pueda suministrar o almacenar energía en función de las necesidades de la red, esta opción es más costosa que la anteriormente mencionada, ya que además el propio vehículo funcionaría como una batería por sí mismo.
- La localización de los puntos de carga es crítico, siendo especialmente sensible la red cuanto mayor sea la lejanía entre subestaciones o fuentes generadoras y puntos de carga.
- La generación distribuida es una manera de amortiguar el impacto de las estaciones de carga en las redes de distribución.
- En las redes ya existentes es de especial interés hacer estudios previos para ver el impacto de la inclusión de los puntos de carga, ya que pueden provocar grandes fluctuaciones de las tensiones, potencias y corrientes como se ha visto.
- En nuevas redes el diseño de las mismas ha de contemplar el impacto de carga adicional que supondrán las estaciones de carga de vehículos eléctricos, para ello se ha de tener en cuenta la capacidad del punto de carga (nº de vehículos) y los niveles de carga admisibles.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. E. Agency, «Transport, energy and CO2 - Moving towards sustainability. 2009.,» IEA, 2009.
- [2] J. Potočnik, «Making the European transport industry "greener, safer and smarter" to boost our industrial competitiveness,» de *Transport Research Arena Opening Ceremony*, Ljubljana, 2008.
- [3] V. R. P.M. Forster, «In climate change,» Cambridge University Press, 2007.
- [4] O. R. N. Laboratory, «Carbon Dioxide Information,» Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2009.
- [5] C. Europea, «Libro blanco del transporte,» Dirección de movilidad y transportes, 2011.
- [6] J. L. James Larminie, *Electric Vehicle Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [7] IDAE, «Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España,» 2014.
- [8] E. A. f. B. E. Vehicles, «Energy consumption, CO2 emissions,» 2009.
- [9] M. Root, *The Tab Battery Book*, Mc Graw Hill.
- [10] L.-A. D. Olivier Tremblay, «Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV,» Electrical Engineering Department, Ecole de Technologie Superieure, Stavanger, 2009.
- [11] K. B. A. B. B. Rajashekara, *The Electrical Engineering Handbook*, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
- [12] M. R. Patel, *Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy*, CRC Press.
- [13] Power and Energy Society, "Distribution Test Feeder," [Online]. Available: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. [Accessed marzo 2016].
- [14] Red Eléctrica de España, «Curva de demanda diaria,» [En línea]. Available: <http://www.ree.es/>. [Último acceso: junio 2016].
- [15] L. M. J. Herrero, «Transporte y movilidad, claves para la sostenibilidad,» Lychnos, Marzo 2011.
- [16] M. Pagliaro, *Catalysis for Sustainable Energy Production*. Edited by Pierluigi Barbaro and Claudio Bianchini, 2009.

- [17] A. T. S. Hadley, «Potential Impacts of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation.,» Oak Ridge National Laboratory, 2008.
- [18] Bharath Y.K. MathWorks Group, *IEEE 14 Bus system according to IEEE guidelines*, 2014.
- [19] P. V. d. Bossche, *Electric and hybrid Vehicle (Chapter 20. E.V. Charging Infrastructure)*, Anderlecht: Elsevier E.V., 2010.